

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y
COMUNICACIONES



TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE UNA ANTENA DE PARCHE DE
BANDA ANCHA CON POLARIZACIÓN CIRCULAR

Grado en Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones

Autor:

FRANCISCO JAVIER ROIG DÍAZ

Director:

JOSÉ LUIS VÁZQUEZ ROY

LEGANÉS, FEBRERO DE 2015

Índice general

1. Introducción a las antenas de parche	8
1.1. Ventajas y desventajas	8
1.2. Origen	8
1.3. Características	9
1.3.1. Tipos de alimentación	9
1.3.2. Medidas	11
2. Antenas de parche con polarización circular	16
2.1. Alimentación con un solo puerto	17
2.1.1. Parche con bordes modificados	17
2.1.2. Parche con esquinas modificados	18
2.1.3. Parche con ranura diagonal	18
2.2. Alimentación con dos puertos	18
3. Objetivos del proyecto	19
3.1. Definición de especificaciones.	19
4. Diseños realizados	21
4.1. Primer diseño realizado: Antena con un gran ancho de banda	21
4.2. Segundo diseño: Antenas con polarización circular	24
4.2.1. Polarización circular con alimentación de un puerto	24
4.2.2. Polarización circular con alimentación de dos puertos	33
4.3. Elección de la topología final y optimización del diseño	35
4.3.1. Primera optimización: aproximación de la alimentación al parche	35
4.3.2. Segunda optimización: introducción de elementos con perdidas	39
4.3.3. Ultima optimización: introducción de elementos con perdidas	42
5. Construcción del prototipo	47
5.1. Medidas	47
6. Conclusiones y futuras líneas de investigación	50
6.1. Conclusiones	50
6.2. Futura líneas de investigación	51

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	3
7. Presupuesto	52
Bibliografía	54

Índice de figuras

1.1. Estructura antena microstrip	9
1.2. Alimentación por línea de transmisión: a) Conexión directa y b)conexión con inserciones. .	10
1.3. Alimentación por sonda de cable coaxial	10
1.4. Alimentación por el método de proximidad	11
1.5. Alimentación por el método de apertura	11
1.6. Red de dos puertos	12
1.7. Tabla significado parámetros S en red de dos puertos	12
1.8. Sistema de coordenadas esféricas	13
1.9. Sistema de coordenadas esféricas en 2D	13
1.10. Elipse de polarización	14
1.11. Ejemplo polarización lineal	14
1.12. Ejemplo polarización circular	14
2.1. Variación de los dos modos ortogonales con un solo puerto de alimentación	17
2.2. Figura parche con bordes modificados	17
2.3. Figura parche con esquinas modificadas	18
2.4. Figura parche ranura diagonal	18
2.5. Figura parche alimentación dos puertos	18
4.1. Estructura antena rectangular, circular y en anillo con parche de alimentación	21
4.2. distribución de los materiales diseño antena con un gran ancho de banda	22
4.3. Condiciones de contorno para plano de masa y el sustrato sean infinitos	23
4.4. Dibujo del primer diseño	23
4.5. Gráfica parámetro S11 primer diseño	23
4.6. Nueva estructura de la antena	24
4.7. Primer parche con borde modificado	25
4.8. Gráfica parámetro S11 del primer parche con borde modificado	25
4.9. Gráfica razón axial del primer parche con borde modificado	25
4.10. Segundo parche con borde modificado	26
4.11. Gráfica parámetro S11 del segundo parche con borde modificado	27
4.12. Gráfica Razon axial del segundo parche con borde modificado	27
4.13. Primer parche con esquina modificado	28
4.14. Parámetro S11 Primer parche con esquina modificado	28

4.15. razón axial primer parche con esquina modificado	29
4.16. Segundo parche con esquina modificado	29
4.17. Parámetro S11 segundo parche con esquina modificado	30
4.18. razón axial segundo parche con esquina modificado	30
4.19. Tercer parche con esquina modificado	30
4.20. Parámetro S11 tercer parche con esquina modificado	31
4.21. razón axial tercer parche con esquina modificado	31
4.22. Parche con ranura diagonal	32
4.23. Parámetro S11 parche con ranura diagonal	33
4.24. razón axial parche con ranura diagonal	33
4.25. Parche con alimentación de dos puertos	33
4.26. Parámetro S11 parche con alimentación de dos puertos	34
4.27. razón axial parche con alimentación de dos puertos desfasadas 90 grados	34
4.28. razón axial parche con alimentación de dos puertos desfasadas 90 grados	35
4.29. Primera optimización tercer parche con esquina modificado	36
4.30. Parámetro S11 primera optimización tercer parche con esquina modificado	36
4.31. razón axial a diversas frecuencias primera optimización	37
4.32. Diagrama de radiación en 3D primera optimización tercer parche con esquina modificado 2,31 Ghz	37
4.33. Coordenadas E_θ y E_ϕ en plano XZ y plano YZ a 2,31 Ghz primera optimización	38
4.34. BW de la razón axial en la primera optimización	38
4.35. Segunda optimización tercer parche con esquina modificado	39
4.36. Parámetro S11 segunda optimización tercer parche con esquina modificado	40
4.37. razón axial a diversas frecuencias segunda optimización	40
4.38. Diagrama de radiación en 3D segunda optimización tercer parche con esquina modificado 2,3 Ghz	41
4.39. Coordenadas E_θ y E_ϕ en plano XZ y plano YZ a 2,3 Ghz segunda optimización	41
4.40. BW de la razón axial en la segunda optimización	42
4.41. Última optimización tercer parche con esquina modificado	42
4.42. Parámetro S11 última optimización tercer parche con esquina modificado	43
4.43. razón axial a diversas frecuencias última optimización	44
4.44. Diagrama de radiación en 3D última optimización tercer parche con esquina modificado 2,45 Ghz	44
4.45. Coordenadas E_θ y E_ϕ en plano XZ y plano YZ a 2,45 Ghz última optimización	45
4.46. BW de la razón axial en la ultima optimización	45
5.1. Frontal diseño enviado a construir	47
5.2. Trasera diseño enviado a construir	47
5.3. Frontal diseño construido	48
5.4. Trasera diseño construido	48
5.5. Adaptación obtenida en el laboratorio	49

Índice de tablas

3.1. Especificaciones de la antena de parche	19
4.1. Dimensiones primer diseño antena de parche	22
4.2. Medidas primer primer parche con borde modificado	26
4.3. Medidas segundo parche con borde modificado	27
4.4. Dimensiones primer parche con borde modificado	28
4.5. Dimensiones segundo parche con borde modificado	29
4.6. Dimensiones tercer parche con borde modificado	31
4.7. Dimensiones primer parche con ranura diagonal	32
4.8. Dimensiones parche con alimentación de dos puertos	34
4.9. Dimensiones primera optimización tercer parche con borde modificado	36
4.10. Dimensiones segunda optimización tercer parche con borde modificado	39
4.11. Dimensiones última optimización tercer parche con borde modificado	43

Agradecimientos

Me gustaría dedicar este trabajo a toda esa gente que me ha acompañado durante esta etapa de mi vida en la universidad: Vulok, Tini, Guille, Suso, Mery, Peter, Crespo, Chusadas, Espi, Oli, Vico, Giorgio, Gorgas, Canario, Alfonso, Javiño, Guti, Charly y demás gente que he conocido a lo largo de estos años y he tenido el placer de compartir buenos y malos momentos dentro y fuera de los muros de la universidad. ¡Gracias a vosotros por hacer esto mucho menos duro y ayudarme en todo momento!

Agradecer también al apoyo de mi familia y amigos que han estado apoyándome en todo momento y dándome ánimos en los momentos mas duros: Daviz, Polako, Fonsi, Pepe, Maki, Gamu, Cesar, Perche, ¡va por vosotros gentuza!

Por último y no menos importante mostrarle mi mas sincero agradecimiento a mi tutor José Luis Vázquez Roy por todo el apoyo y ayuda recibido durante la realización de este proyecto, gracias por tu paciencia y dedicación.

Capítulo 1

Introducción a las antenas de parche

1.1. Ventajas y desventajas

Las antenas tipo parche o también conocidas como antenas microstrip, ya que se basan en dicha tecnología. Su uso tiene un gran auge para aplicaciones en las que el tamaño reducido es importante por ejemplo: aeronáutica, aviación, satélites, aplicaciones en misiles, dispositivos móviles, comunicaciones inalámbricas en general, y para frecuencias elevadas principalmente en los rangos de microondas y ondas milimétricas[1]

Las ventajas que este tipo de antenas nos ofrecen son: tendencia a la miniaturización al lograr dispositivos cada vez más pequeños y con componentes ligeros[2], fáciles de integrar tanto a superficies planas como no planas, sencillas, de fácil producción en masa (por lo que los costos pueden ser muy reducidos), fáciles de adaptar con circuitos integrados de microondas, versátiles en términos de impedancia, patrón, polarización y frecuencia de resonancia.

Las principales desventajas de este tipo de antenas que se pueden citar son: baja potencia de radiación (por su estructura no se pueden soportar altas potencias en los componentes de una antena microstrip), baja eficiencia, ancho de banda reducido, considerables pérdidas y son fácilmente afectadas por el factor térmico (sobre todo si se trabaja sobre sustratos flexibles).

La ventaja que la mayoría de los problemas descritos anteriormente se podrían solventar con la selección de unos buenos materiales así como un diseño adecuados como la eficiencia baja a alta frecuencia.

1.2. Origen

La tecnología microstrip en la cual se basan las antenas tipo parche es el resultado de una evolución que estuvo regida bajo el principio de realizar diseños de dimensiones reducidas tanto en antenas como en líneas de transmisión que pudieran ser fácilmente acoplados a cualquier dispositivo así como diseñar una línea de transmisión plana basada en una tecnología impresa sencilla de fabricar.

Los antecedentes de los circuitos microstrip se remontan a los años 50 donde los primeros circuitos impresos para microondas. Para el diseño de estos circuitos se usó la tecnología striplines. Una stripline está constituida por una tira delgada conductora en un dieléctrico, el cual posee dos capas metalizadas en el exterior (en la parte superior e inferior del dieléctrico). Tanto la placa superior de la estructura como la inferior tienen el mismo potencial (tierra). Por su arreglo balanceado las striplines confinan la mayor parte de los campos (de forma TEM) dentro del dieléctrico. A partir de las striplines se empezó a utilizar una nueva forma de circuitería de microondas y sus principales aplicaciones de la stripline son los circuitos pasivos.

Las líneas de microstrip aparecieron publicadas por primera vez en 1952, muy cerca de la aparición de las striplines (1951). La diferencia en el nuevo modelo (microstrip) fue que se retiró la parte superior del sustrato dejando la línea conductora en el exterior. A pesar de la cercanía de las fechas, la tecnología

microstrip tardó más en ganar auge ya que estas estructuras al ser muy abiertas tienen amplias pérdidas por radiación y en particular cuando son utilizadas en sustratos de baja permitividad como los que se tenían en aquellos días. Conforme la tecnología fue avanzando y se fueron fabricando sustratos de menores pérdidas, el uso de las líneas de microstrip fue aumentando ampliamente [7]

1.3. Características

Las antenas tipo parche están basadas en la tecnología microstrip y sus características se describen a continuación. Vamos a centrarnos en las antenas de parche del tipo rectangular que serán en las que nos centraremos en el proyecto, los diferentes tipos de antenas de parche dependerán del diseño del parche que tengan. Las antenas tipo parche poseen una tira conductora de largo L , ancho W y grosor t . La tira conductora se encuentra situada en la parte superior de un sustrato dieléctrico, el cual tiene un ancho h . En la parte inferior del sustrato dieléctrico se tiene un plano referenciado a tierra.[1][2]

La siguiente figura es un ejemplo de antena de parche rectangular:

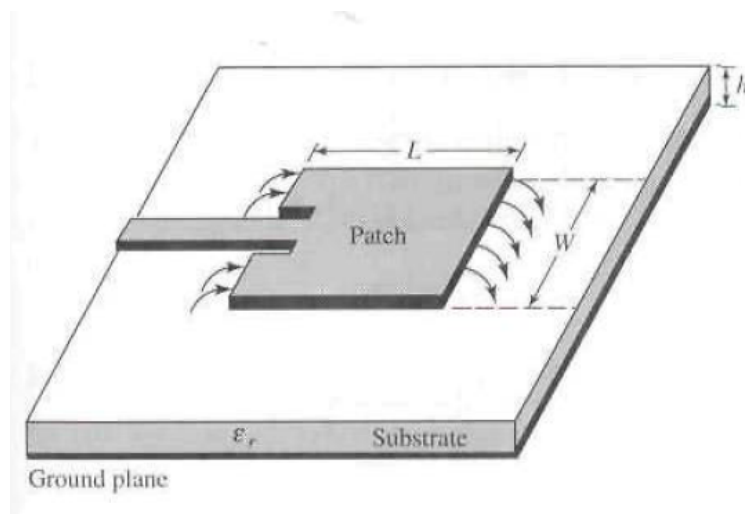


Figura 1.1: Estructura antena microstrip

1.3.1. Tipos de alimentación

Uno de los aspectos a tener en cuenta cuando se diseña una antena consiste en el esquema de alimentación que tendrá ésta, puesto que sin una estructura eficiente de alimentación las antenas no funcionarán correctamente. Existen diferentes métodos para alimentar una antena de forma que radie lo más eficientemente posible en las frecuencias deseadas mediante un correcto acoplamiento de impedancias. A pesar de existir muchos métodos para alimentar una antena, éstos se pueden condensar en 3 categorías principales: alimentación directa, alimentación por proximidad y alimentación por apertura [2]

1. Alimentación directa Este tipo de alimentación requiere de un contacto directo entre la estructura de alimentación y la antena radiante. Los dos principales métodos de alimentación en esta categoría son: alimentación por línea de transmisión (línea microstrip) y alimentación por conector coaxial.[7]

- Alimentación por línea de transmisión

Este método consiste en alimentar al parche rectangular conectándole directamente la línea de transmisión (diseñada para tener la impedancia característica deseada). Existen dos formas del método por línea de transmisión, conectando la línea de transmisión directamente en un borde del parche y conectando la línea de transmisión en un borde con inserciones en el parche. El acoplamiento de impedancia se puede modificar en las dos formas de alimentación con

microstrip, en el caso de la conexión directa variando la posición al borde del parche generará un mayor o mejor acoplamiento de impedancia y en el caso de la alimentación con línea de transmisión por medio de inserciones, la profundidad de la inserción establece según lo deseado el acoplamiento de impedancia[2]. En la siguiente figura se muestran los dos tipos mencionados anteriormente e la figura.1.2

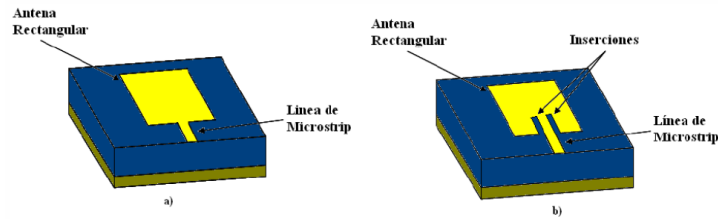


Figura 1.2: Alimentación por línea de transmisión: a) Conexión directa y b) conexión con inserciones.

- Alimentación por conector coaxial

Este método consiste en hacer que el conductor central del cable coaxial del cable coaxial haga contacto directamente al parche rectangular, mientras que la parte el conductor exterior de éste se conecte al plano de tierra de la antena microstrip, esta conexión directa se realiza por la parte inferior de la antena, es decir, en el plano de tierra. El acoplamiento de impedancia depende de la posición de la sonda coaxial en relación con el parche de tal forma que colocándola correctamente generará un mejor acoplamiento.[2] En la siguiente figura se puede ver un ejemplo sacado de la referencia [1]:

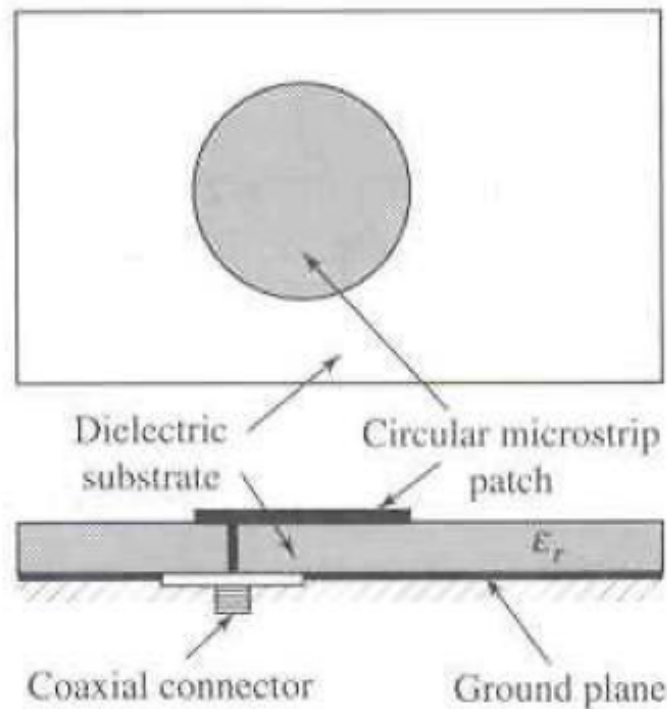


Figura 1.3: Alimentación por sonda de cable coaxial

2. Alimentación por proximidad

En estos métodos la alimentación no tiene contacto directo con el parche si no que el acoplamiento

es electromagnético. En éste método se tiene al parche sobre un sustrato dieléctrico y en la parte inferior de ésta estructura se tiene una línea de alimentación sobre de otro sustrato dieléctrico con un plano tierra. Éste método tiene la ventaja que el radiador así como la estructura de alimentación pueden optimizarse por separado cuando se utilizan dos capas de sustratos dieléctricos: un sustrato dieléctrico para obtener las mejores características del parche (sustratos más anchos con permitividades eléctricas bajas) y de la alimentación (sustratos delgados y con permitividades eléctricas altas)[2]. La siguiente figura muestra un ejemplo sacado de la referencia [1]:

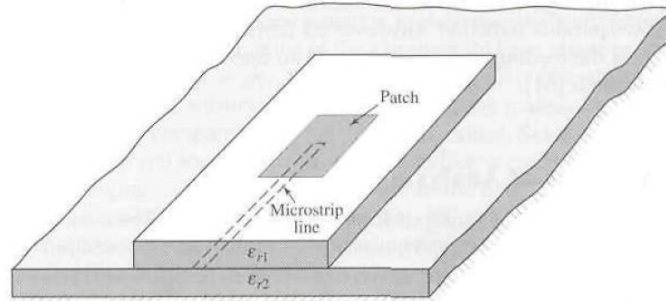


Figura 1.4: Alimentación por el método de proximidad

3. Alimentación por apertura

El método por apertura presenta similitud con el de proximidad debido a que también utiliza dos sustratos dieléctricos, uno para el radiador y otro para la alimentación de éste. La estructura de éste método es la siguiente: se tiene un radiador sobre un sustrato dieléctrico y sobre un plano de tierra compartido seguido de otro sustrato dieléctrico (de la alimentación) y finalmente una línea de alimentación en la parte inferior de toda la estructura. El plano de tierra tiene una apertura cuyas dimensiones y posición influyen en la impedancia y por ende en el acoplamiento de la antena. Una ventaja con respecto a la alimentación por proximidad es que en la alimentación por apertura, al estar la línea de alimentación en la parte inferior y separada de la antena por el plano de tierra, la radiación [7]. Ejemplo de alimentación por apertura

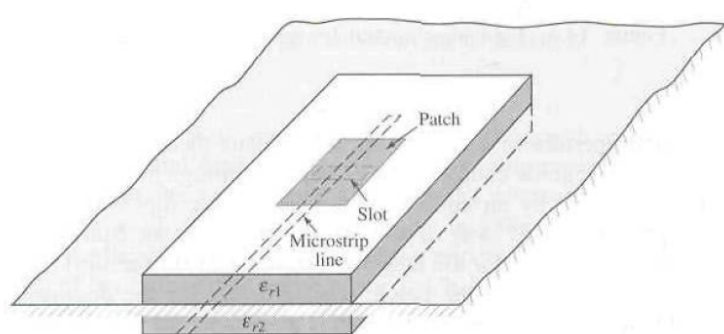


Figura 1.5: Alimentación por el método de apertura

1.3.2. Medidas

1.3.2.1. Parámetros de dispersión (Parámetros S)

Las antenas se pueden caracterizarse también como una red de dos puertos, donde uno de ellos es el puerto físico de entrada de la antena, típicamente de valor 50Ω , y el otro es un puerto físico de radiación. Los

circuitos de microondas se pueden caracterizar de diversas maneras, tales como matrices de impedancia Z , matrices admitancia Y , entre otras. Estos parámetros, que relacionan magnitudes de tensión y corriente, se obtienen considerando circuitos abiertos o cortocircuitos en sus puertos. Este hecho es difícil de conseguir a altas frecuencias. Por ello se suelen utilizar los parámetros de dispersión o parámetros S , que sirven a cualquier frecuencia ya que no necesitan ningún tipo de consideración adicional. Simplemente se basan en los niveles de potencia que se perciben en los terminales de los dos puertos según unas nuevas ondas de tensión incidente a_i y reflejada b_i normalizadas. Las ondas incidentes se dirigen en dirección entrante al circuito y las reflejadas, por el contrario, en dirección saliente al circuito tal y como se observa en la siguiente figura:

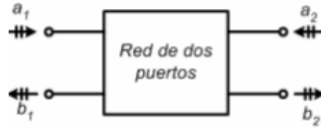


Figura 1.6: Red de dos puertos

En el caso de un circuito de 2 puertas existen cuatro parámetros S y la relación entre sus ondas incidentes y reflejadas vendrán definidas por estas dos ecuaciones:

$$b_1 = s_{11}a_1 + s_{12}a_2 \quad (1.1)$$

$$b_2 = s_{21}a_1 + s_{22}a_2 \quad (1.2)$$

Para calcular el parámetro de dispersión s_{ji} es necesario que todos los accesos de la red se carguen con sus respectivas impedancias características a excepción del puerto i -ésimo en el que se colocará un generador que produzca una onda incidente a_i

En la siguiente figura se puede ver el significado de cada parámetros s en una red de dos puertos:

Parámetro	Coeficiente	Descripción	Fórmula
s_{11}	Reflexión a la entrada	Mide la cantidad de potencia que se refleja en el puerto 1 cuando se genera una onda incidente en el puerto 1.	$s_{11} = \frac{b_1}{a_1} \Big _{a_2=0}$
s_{12}	Transmisión o ganancia inversa	Mide la cantidad de potencia que llega al puerto 1 cuando la red se alimenta por el puerto 2.	$s_{12} = \frac{b_1}{a_2} \Big _{a_1=0}$
s_{21}	Transmisión o ganancia directa	Mide la cantidad de potencia que llega al puerto 2 cuando la red se alimenta por el puerto 1.	$s_{21} = \frac{b_2}{a_1} \Big _{a_2=0}$
s_{22}	Reflexión a la salida	Mide la cantidad de potencia que se refleja en el puerto 2 cuando se genera una onda incidente en dicho puerto.	$s_{22} = \frac{b_2}{a_2} \Big _{a_1=0}$

Figura 1.7: Tabla significado parámetros S en red de dos puertos

1.3.2.2. Diagrama de Radiación

El diagrama de radiación de una antena se define como la representación gráfica de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas espaciales. El diagrama de radiación se define en regiones de campo lejano. Se considera campo lejano a la distribución del campo angular que no depende de la distancia de la antena. Se considera campo lejano a distancias de la antena superiores a $2D^2/\lambda$, siendo D la dimensión máxima de la antena y λ la longitud de onda de funcionamiento de la misma.

El diagrama de radiación se puede representar en 3D utilizando diferentes técnicas gráficas o mediante cortes en planos. El sistema de referencia más utilizado para la representación del diagrama de radiación

es el sistema de coordenadas esféricas, definido por tres magnitudes: el radio r , el ángulo polar o colatitud θ y el azimut ϕ .

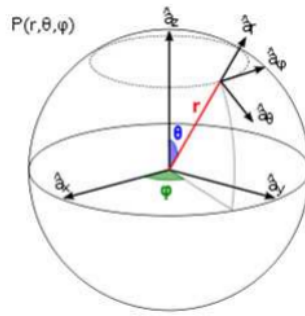


Figura 1.8: Sistema de coordenadas esféricas

En lo que se refiere a representación 2D, se utilizan coordenadas polares y cartesianas. En las polares el espacio se representa como una circunferencia y el modo en que las ondas se disipan en el entorno está representado en grados. Ofrecen una información más clara de la distribución de la potencia en diferentes puntos del espacio. En las coordenadas cartesianas o rectangulares, en el eje de abscisas queda representada la variable angular.

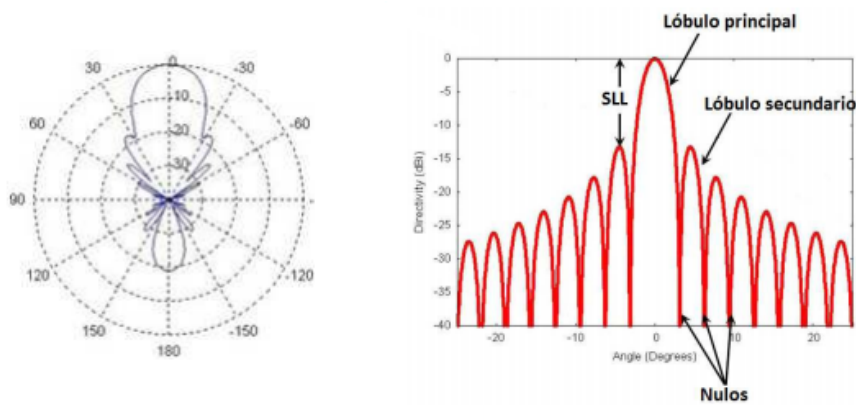


Figura 1.9: Sistema de coordenadas esféricas en 2D

Los parámetros más importantes del diagrama de radiación son los siguientes:

- Dirección de apuntamiento: Es la dirección de máxima radiación.
- Lóbulo principal: Es el margen angular en torno a la dirección de máxima radiación. Define la dirección de máximo apuntamiento.
- Lóbulos secundarios: Son los dos máximos relativos que rodean al principal y que tienen una amplitud menor.
- Anchura de haz a -3 dB: Es la separación angular de direcciones en las que el diagrama de radiación de un haz toma el valor de la mitad del máximo. Es muy útil para determinar visualmente la directividad de una antena
- Relación de lóbulo principal a secundario (SLL): Es el cociente en dB entre el valor máximo del lóbulo principal y el valor máximo del lóbulo secundario

1.3.2.3. Polarización

Como ya se sabe, una antena emite o recibe ondas electromagnéticas. Por tanto, en cada punto del espacio existe un vector de campo eléctrico que depende tanto de la posición como del tiempo. La polarización de una antena en una dirección determinada es la variación temporal del campo radiado en esa misma dirección. Esa variación de dirección del campo y su sentido de giro traza una figura vista desde la antena que es la que define el tipo de polarización. Es lo que se llama, para el caso general, elipse de polarización.

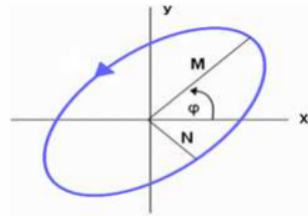


Figura 1.10: Elipse de polarización

Aunque normalmente la polarización tenga la forma de una elipse, se pueden dar algunos casos particulares:

- Polarización lineal: Si la figura trazada en el tiempo es un segmento entonces la polarización será lineal. Además, esta puede ser tanto vertical como horizontal.

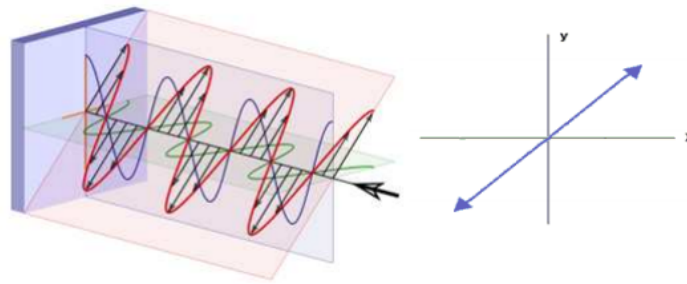


Figura 1.11: Ejemplo polarización lineal

- Polarización circular: Esta situación se dará si el campo traza una circunferencia cuando se desplaza en el tiempo. Este fenómeno se da cuando las componentes tienen igual amplitud y están en cuadratura de fase. Puede circular a derechas o a izquierdas dependiendo del sentido de giro.

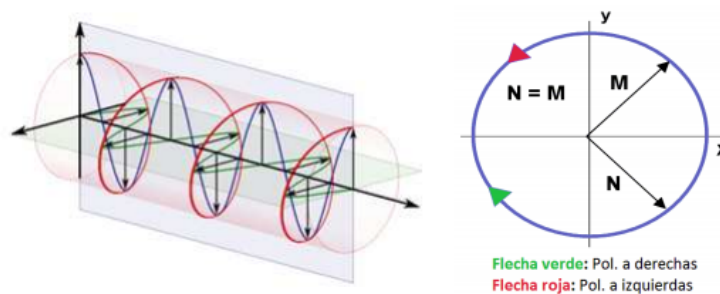


Figura 1.12: Ejemplo polarización circular

Para conocer el tipo de polarización que tenemos bajo estudio se define un parámetro denominado Razón Axial o Axial Ratio (AR) como el cociente entre el eje mayor y el eje menor de la elipse de polarización, es decir, $AR = M/N$.

De esta manera, el AR será un valor comprendido entre $1 \leq AR \leq \infty$ donde:

- Si $AR = \infty$: Polarización lineal
- Si $AR = 1$: Polarización circular

1.3.2.4. Ancho de Banda (BW)

Debido a la geometría finita de las antenas, estas están limitadas a funcionar en un rango de frecuencias delimitado. Es decir, el ancho de banda es aquel rango de frecuencias en el que la antena se comporta con unas determinadas características. Este parámetro se puede presentar como el cociente de las frecuencias entre las que opera o en forma de porcentaje:

$$BW = \frac{f_{max} - f_{min}}{f_0} * 100 \quad (1.3)$$

donde f_{max} y f_{min} son las frecuencias máxima y mínima que delimitan el ancho de banda y f_0 es la frecuencia central.

Capítulo 2

Antenas de parche con polarización circular

Debido a las características de polarización circular, las antenas con polarización circular tienen varias ventajas importantes en comparación con las antenas que utilizan polarizaciones lineales por lo que se están convirtiendo en una tecnología clave para varios sistemas inalámbricos, incluyendo las comunicaciones por satélite, comunicaciones móviles, sistemas de navegación por satélite (GNSS), sensores inalámbricos, radio identificación de frecuencia (RFID), la transmisión de energía inalámbrica, redes de área local inalámbricas (WLAN), redes de área personal inalámbricas (WPAN), sistemas de recepción de televisión en el mundo, Interoperabilidad para Microwave Acceso (WiMAX) y Direct Broadcasting Service (DBS).

Las antenas con polarización circular son muy eficaces en la lucha contra las interferencias multi-trayecto o desvanecimiento. La señal de radio reflejada desde el suelo u otros objetos se traduce en una inversión de polarización, es decir, las reflexiones de la polarización circular derecha muestran la polarización circular izquierda. Una antena con polarización a derechas tendrá un rechazo de una señal reflejada con polarización a izquierdas, reduciendo así las interferencias multi-trayecto desde las señales reflejadas. La segunda ventaja es que la antena con polarización circular es capaz de reducir el efecto de rotación de Faraday debido a la ionosfera. El efecto de la rotación de Faraday provoca una pérdida de señal significativa (aproximadamente 3 dB o más) si se emplean señales polarizadas linealmente. La antena con polarización circular es inmune a este problema, por lo tanto la antena con polarización circular es ampliamente utilizada para aplicaciones de telemetría espacial de satélites, sondas espaciales y misiles balísticos para transmitir o recibir señales de que han sido objeto de rotación de Faraday viajando a través de la ionosfera. Otra ventaja de utilizar antenas con polarización circular es que no se requiere la orientación estricta entre antenas transmisoras y receptoras. Esto es diferente a las antenas polarizadas lineal que están sujetas a pérdidas por desajuste de polarización y se produce una desalineación de la polarización entre antenas transmisora y receptora. Esto es útil para comunicaciones móviles por satélite donde es difícil mantener orientación constante de la antena. Con la polarización circular, la fuerza de las señales recibidas es bastante constante, independientemente de la orientación de la antena. Estas ventajas hacen que las antenas con polarización circular sean muy atractivas para muchos sistemas inalámbricos [4].

Los parches alimentados por los esquemas que hemos presentado en apartado 1.3.1 tienen polarización lineal (corresponde a un modo TM₁₀ en la cavidad del parche). Para conseguir la polarización circular, es necesario, o bien, excitar simultáneamente el TM₀₁ en el mismo parche con otro puerto (con un desfase +90 o -90 según el sentido de giro de la polarización) o mediante una modificación de la metalización (perturbación). En este segundo caso, con un único puerto, conseguimos excitar el otro modo gracias a la perturbación.

A continuación vamos a describir estas dos maneras de conseguir la polarización circular según la alimentación de la antena mediante un puerto o dos puertos. Estos diseños serán en los que nos basaremos para construir la antena.

2.1. Alimentación con un solo puerto

En el apartado de alimentación con un solo puerto descrito en la referencia [5], las dimensiones de la antena microstrip son modificadas de manera que las frecuencias de resonancia f_1 y f_2 de los dos modos ortogonales se cierran cada una sobre otro tal como se aprecia en la siguiente figura:

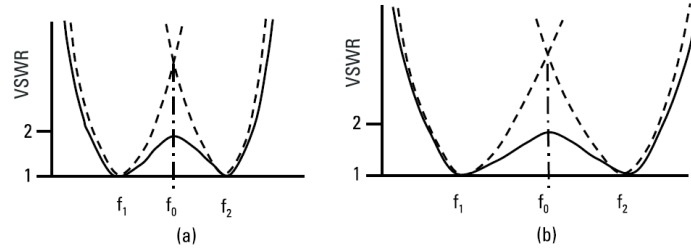


Figura 2.1: Variación de los dos modos ortogonales con un solo puerto de alimentación

La antena se excita a una frecuencia f_0 entre las frecuencias de resonancia de estos dos modos, de manera que la magnitud de los dos modos excitados es igual. También, se selecciona la posición del puerto de alimentación de tal manera que excita los dos modos ortogonales con diferencia de fase de $+45^\circ$ y -45° con respecto al punto de alimentación, lo que resulta en cuadratura de fase entre los dos modos.

Para un sustrato más grueso con una constante dieléctrica baja, el BW de la MSA es grande, y por lo tanto la separación mayor entre f_1 y f_2 como se puede apreciar en la figura 2.1 b. Sin embargo, la magnitud de los dos modos ortogonales sean igual sólo a f_0 , y por tanto la ancho de banda en razón axial es generalmente limitada para estas antenas microstrip de un solo puerto.

A continuación veremos las diversas modificaciones del parche descritas en la referencia [5]

2.1.1. Parche con bordes modificados

En lugar de utilizar un antena microstrip casi cuadrada para generar una polarización circular, los bordes del parche se pueden modificar mediante la adición de trozos o cortando muescas como se muestra en la Figura 2.2. Mediante la adición de un único trozo o cortando una muesca, también se podría obtener la polarización circular, pero entonces la configuración no sería simétrica. Sin embargo, siempre y cuando las áreas eficaces totales de estas perturbaciones son del mismo orden, el rendimiento de un borde modificado es similar al de dos bordes modificados. Nosotros nos centraremos en el estudio de la sustracción o añadido de un trozo del parche. Las dimensiones de las muescas son las que nos darán un mejor resultado respecto a la razón axial.

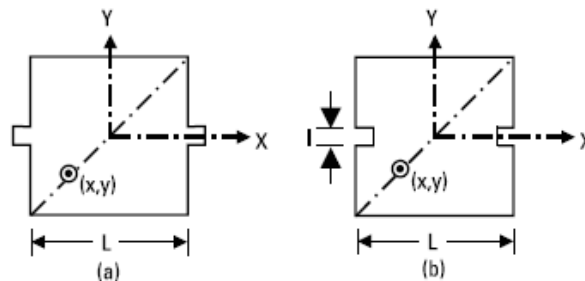


Figura 2.2: Figura parche con bordes modificados

2.1.2. Parche con esquinas modificadas

Otra de las maneras de conseguir que las antenas de parche radien con polarización circular es modificando las esquinas del parche. Los tipos de diseños que vamos a estudiar son los siguientes:

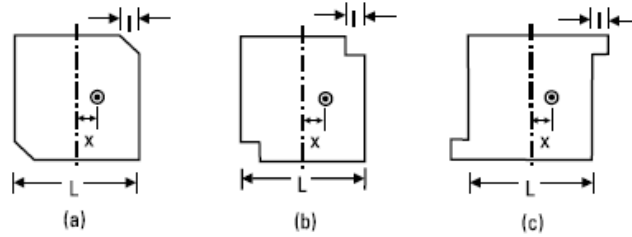


Figura 2.3: Figura parche con esquinas modificadas

La polarización circular en este tipo de diseños se obtiene debido a que cortando dos esquinas diagonalmente opuestas hace que la frecuencia de resonancia del modo a lo largo de esta diagonal sea mayor que para el modo a lo largo de la diagonal sin cortar.

2.1.3. Parche con ranura diagonal

El otro diseño que nos proponen en la referencia [5] es el siguiente:

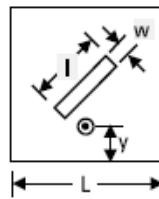


Figura 2.4: Figura parche ranura diagonal

Este diseño se basa en la eliminación de un trozo de la diagonal. Esto permite que la diferencia en las frecuencias de resonancia de los modos ortogonales este causada por la ranura rectangular, que hace que las longitudes de trayectoria de las dos diagonales desigual.

2.2. Alimentación con dos puertos

La otra manera de conseguir la polarización circular que nos describe la referencia [5] es mediante la excitación de la antena por dos puertos con modos ortogonales entre (uno TM₀₁ y otro TM₁₀), que cuya amplitud sea igual y el desfase entre ellas sea de +90 o -90 grados.

El diseño planteado en el libro sería:

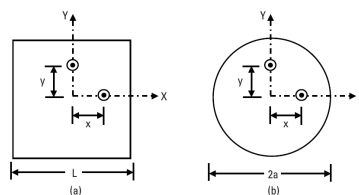


Figura 2.5: Figura parche alimentación dos puertos

Capítulo 3

Objetivos del proyecto

En este proyecto se diseñara una antena de parche de bajo coste la cuya característica principal sea una ancho de banda de adaptación a -10 db del 20 % y simultáneamente el mayor ancho de banda en la razón axial para conseguir una polarización circular. Queremos que la frecuencia de trabajo este centrada en 2,4 Ghz. La elección de este tipo de diseño se debe a que no hay muchas antenas con este tipo de características, si que existen diseños de antenas de parche con un gran ancho de banda y otras con polarización circular individualmente pero lo que pretendemos es unir estas características y conseguir una antena que las mantenga conjuntamente que es donde reside la complejidad del proyecto.

3.1. Definición de especificaciones.

En la siguiente tabla mostramos las características de partida con las que queremos diseñar la antena:

Tipo de antena	Antena de parche
Materiales	Fibra de vidrio, espuma y cobre
Frecuenciade trabajo	2400 MHz
ancho de banda	20 % (480 Mhz)
Polarización	Circular
Razón Axial	5 db de máximo

Tabla 3.1: Especificaciones de la antena de parche

La antena sera una antena multicapa compuesta por una capa de espuma simulando el vacío, una capa de fibra de vidrio y el correspondiente plano de masa.

Los procedimientos que seguiremos para llegar a la realización del proyecto sera partir de un diseño de una antena con un ancho de banda en adaptación grande y polarización lineal, como el citado en la referencia [6]. Primero adaptaremos la antena a la frecuencia deseada mediante la modificación de las medidas del parche y puerto de alimentación.

Los siguientes diseños se centraran en conseguir que la antena radie con una polarización circular, para ello nos basaremos en los diseños mencionados en la referencia [5]. Estas antenas son todas con alimentación de un solo puerto, otro diseño que analizaremos para conseguir la polarización circular sera la alimentación de una antena mediante dos puertos cuyas señales estén desfasas 90 grados. La diferencia de las antenas descritas en la referencia [5] y la que pretendemos diseñar nosotros es que en las citadas en el articulo tiene el puerto conectado directamente al parche (concretamente ene la diagonal del parche), mientras que nosotros para conseguir que la antena tenga un buen ancho de banda es que el puerto no este conectado al parche directamente sino a un parche de alimentación muy cercano al parche como vemos en la referencia [6].

Para la realización de este proyecto usaremos como herramienta el programa de simulación CST MICROWAVE STUDIO [3], programa específico para diseño y simulación de antenas. Vamos a emplear la herramienta para hacer análisis en el dominio del tiempo. Los datos que analizaremos en estos diseños será el parámetro de reflexión en el puerto 1 (S_{11}), es decir, las pérdidas de retorno. Para calcular el ancho de banda en adaptación, nos fijaremos cual es ancho de banda que este por debajo de los -10 db. Buscaremos que este lo mas centrado a la a frecuencia 2,4 Ghz.

El otro dato a analizar es el parámetro de la razón axial en campo lejano para comprobar la polarización circular. La razón axial cuanto mas próximo este de 0 db obtendremos una polarización mas cercana a la circular. Nosotros para empezar pondremos como tope un valor de 5 db. En las primeras simulaciones contaremos con materiales sin pérdidas y una vez que alcancemos los resultados deseados introduciremos el parámetro de pérdidas para que las simulaciones sed parezcan lo mas posible a la realidad.

La alimentación de la antena en la primeras simulaciones contara con un puerto discreto que cambiaremos en las últimas simulaciones por una guía onda que sera lo usaremos en la fabricación de la antena. Para la contribución de la antena contaremos con la ayuda del taller de la Oficina Técnica de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. Una vez construida haremos una serie de pruebas en los laboratorios de la Universidad Carlos III de Madrid para comparar los datos obtenidos en las simulaciones y los obtenidos con la antena.

Los siguientes capítulos describiremos todos los pasos y análisis realizados para llegar a conseguir los objetivos marcados. En el capitulo 4 describiremos las diversas simulaciones que hemos llevada a cabo para alcanzar el diseño definitivo. Partiremos del diseño de una antena con un ancho de banda en adaptación grande pero polarización lineal, este diseño nos permitirá coger soltura con el programa empleado para el análisis. Las siguientes simulaciones se centraran en los diseños descritos en el capítulo2 para conseguir la polarización circular. Por ultimo procederemos a optimizar el diseño elegido para obtener unos resultados lo mas parecidos a los marcados. En el capitulo 5 mostraremos el diseño construido así como los resultados obtenidos en el laboratorio para poder compararlos con los obtenidos en las simulaciones y elaborar una serie de conclusiones y futuras lineas de investigación.

Capítulo 4

Diseños realizados

4.1. Primer diseño realizado: Antena con un gran ancho de banda

El primer diseño que realizamos en un diseño es un diseño de antena de parche con un alto ancho de banda ya que unas de los principales inconvenientes de las antenas de parche es el reducido ancho de banda. Una de las formas de resolver este tipo de problemas es aumentar el grosor de los sustratos, pero esto nos introducir una desadaptación de impedancias. Para solventar este problema decidimos introducir un pequeño parche de alimentación en el mismo plano que esta el parche de acuerdo con lo que se cita en la referencia.[6] Este primer diseño tiene una polarización lineal, en los diseños sucesivos nos centraremos en conseguir la polarización lineal median la introducción de otro puerto de alimentación y desfazar las señales 90 grados o modificar la forma del parche. Para el diseño que vamos a realizar ahora valdría un parche rectangular, circular o en anillo, hemos optado por el rectangular ya que nos supondrá mas fácil modificarlo para obtener en el futuro la polarización circular.

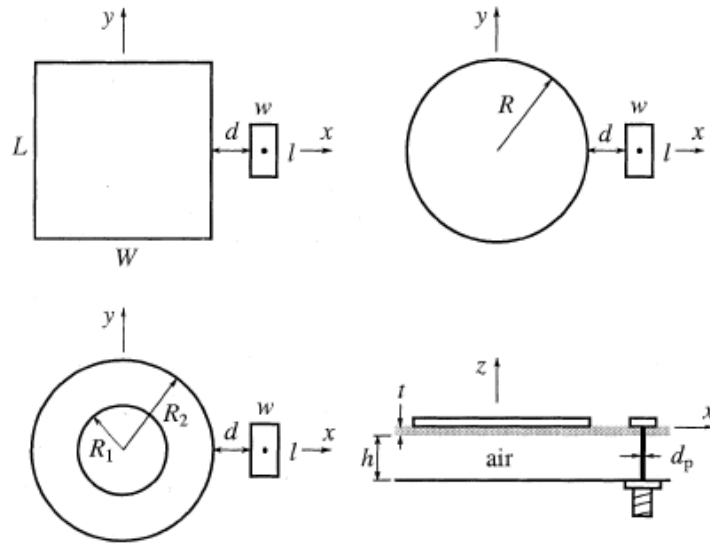


Figura 4.1: Estructura antena rectangular, circular y en anillo con parche de alimentación

La distribución de los distintos materiales para esta simulación es la siguiente:

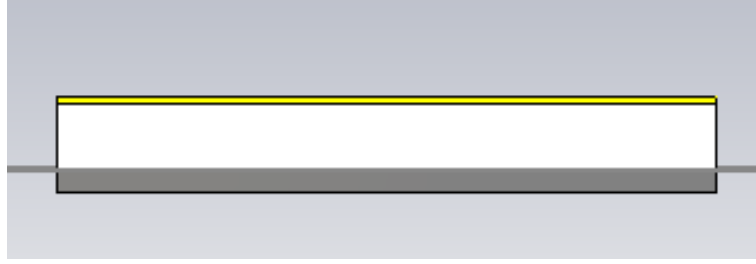


Figura 4.2: distribución de los materiales diseño antena con un gran ancho de banda

Desde arriba hacia abajo distinguimos los siguientes materiales representados en diferentes colores:

- Fibra de vidrio en amarillo
- espuma en blanco
- Conductor eléctrico perfecto (PEC) en gris

Las características de los materiales que usaremos este diseño:

- Para la fibra de vidrio usaremos la capa FR-4, fibra de vidrio con una permitividad eléctrica de $\epsilon = 4.3$
- Para simular el vacío usaremos espuma.
- Usaremos un conductor eléctrico perfecto (PEC) para el plano de masa y el parche.

Las medidas que hemos introducido para la primera simulación son las siguientes, manteniendo la nomenclatura de la figura 4.1

L, W	51 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	10 mm
w	5 mm
d	8 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,6 mm
Altura parche	0,05 mm

Tabla 4.1: Dimensiones primer diseño antena de parche

Para esta simulación pondremos las condiciones de contorno todas en 'open' menos la de Z que estará en 'open+add space' con esto conseguimos que el plano de masa y el sustrato sean infinitos. Este tipo de configuración en las condiciones de contorno son de tipo absorbentes que simulan lo que tendríamos en una cámara anecoica. Podemos observar las características en la figura 4.3

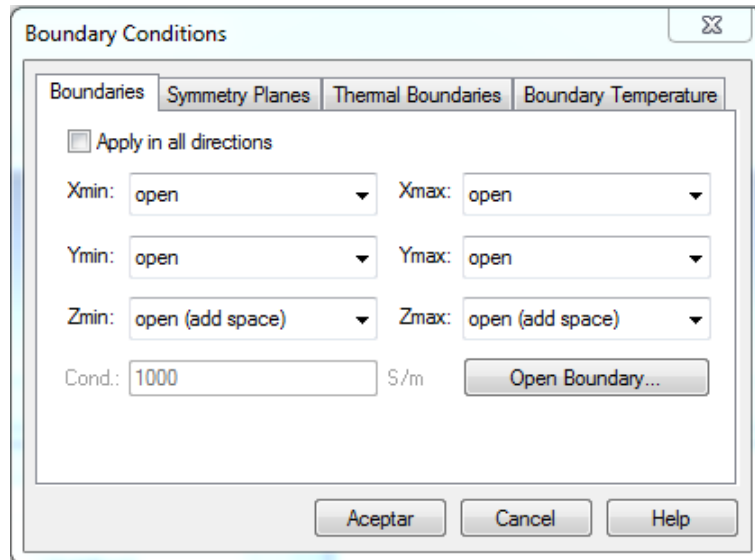


Figura 4.3: Condiciones de contorno para plano de masa y el sustrato sean infinitos

El tipo de excitación en esta simulación sera un puerto discreto de 50Ω , que nos proporcionara.....

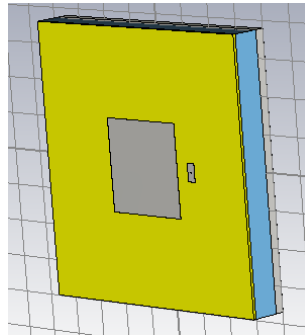


Figura 4.4: Dibujo del primer diseño

En la figura 4.5 podemos ver el ancho de banda en adaptación, se pueden ver las marcas de los puntos limites a -10 db y los frecuencia a la que se obtiene mayor adaptación:

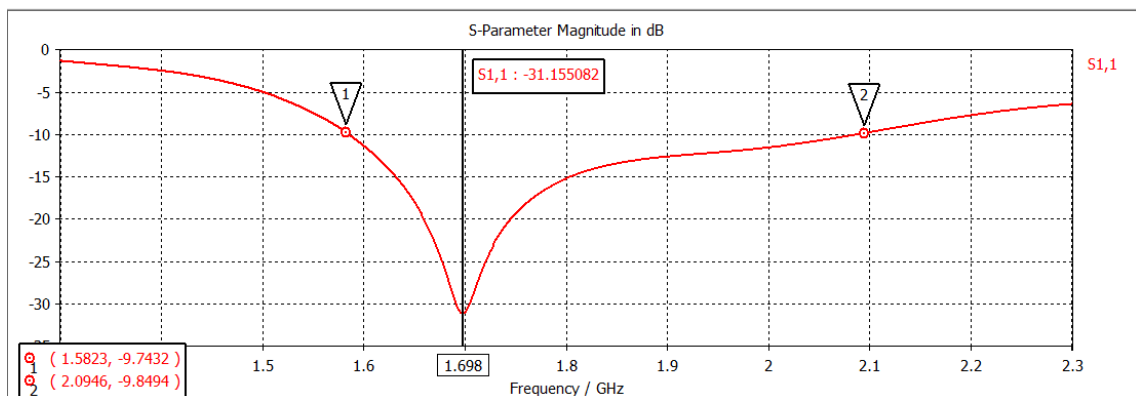


Figura 4.5: Gráfica parámetro S11 primer diseño

Como podemos ver el ancho de banda en adaptación a -10 db para este tipo de antena es:

$$BW = (2,0946\text{GHz} - 1,5823\text{GHz})/1,7\text{GHz} = 0,3013 = 30\%$$

Observamos que con este diseño de alimentación conseguimos un buen ancho de banda. En los siguientes trabajos nos centraremos en obtener la polarización circular ya que con este tipo de alimentación conseguimos el objetivo del ancho de banda en adaptación.

4.2. Segundo diseño: Antenas con polarización circular

Como mencionamos anteriormente en el capítulo 2 existen diversas formas de conseguir la polarización circular en las antenas de parche. Una de las maneras descritas en el capítulo 2 es mediante la modificación de la superficie del parche y con un único puerto de alimentación en la superficie del parche. La otra forma de conseguir una polarización circular que describimos es la de alimentar la antena mediante dos puertos cuyas señales estén desfasadas 90 grados. Empezaremos con el análisis de los distintos diseños de la alimentación con un solo puerto.

4.2.1. Polarización circular con alimentación de un puerto

El objetivo de estos diseños es llegar a uno que tenga una adaptación a 2,4 Ghz con un ancho de banda del 20 % a -10 db y también que dentro del ancho de banda de adaptación consigamos el máximo ancho de banda con una polarización circular, es decir, que la razón axial este lo mas cercano a 0 db (consideraremos como tope 5 db) como lo mencionamos en el capítulo 3. Para este tipo de simulaciones mantendremos las medidas del plano de masa, así como las del sustrato del vacío. La estructura de la antena sufrirá una pequeña modificación con respecto a mencionada en el apartado 4.1, añadiremos una capa mas de FR-4, es decir, el diseño quedaría (desde el plano de masa hacia arriba):

- plano de masa
- primera capa FR-4 de altura 1,5mm
- Vacío
- segunda capa FR-4 de altura 0,5mm
- parche

En el siguiente dibujo podemos observarlo con color amarillo la capa FR-4, con color azul el vacío y color gris el plano de masa:

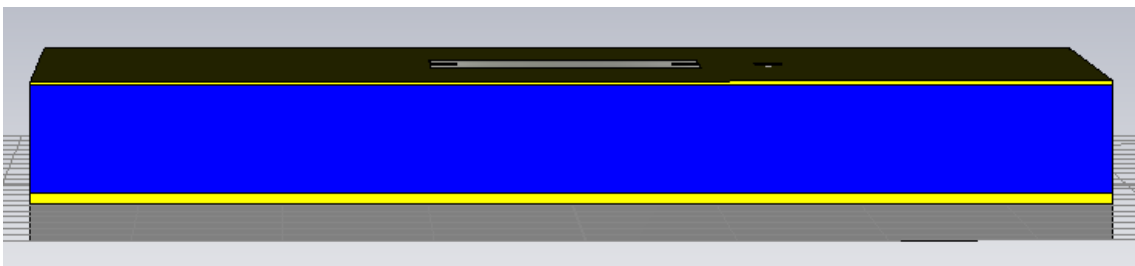


Figura 4.6: Nueva estructura de la antena

4.2.1.1. Parches con bordes modificados

Empezamos analizando un diseño de antena con los bordes modificados. El primero de ellos consta de quitar dos pequeños trozos a mitad altura del parche.

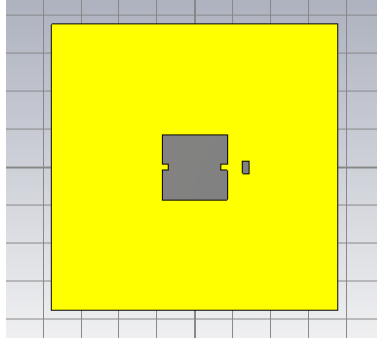


Figura 4.7: Primer parche con borde modificado

Los parámetros que hemos estado modificando han sido: el largo y ancho del parche (parámetros L y W de la figura 4.1), el largo y ancho del puerto de alimentación (parámetros l y w de la figura 4.1) y las dimensiones del cuadro a eliminar en el parche (parámetros l de la figura 2.2). Tras varias simulaciones los mejores resultados obtenidos son los siguientes en adaptación son los siguientes:

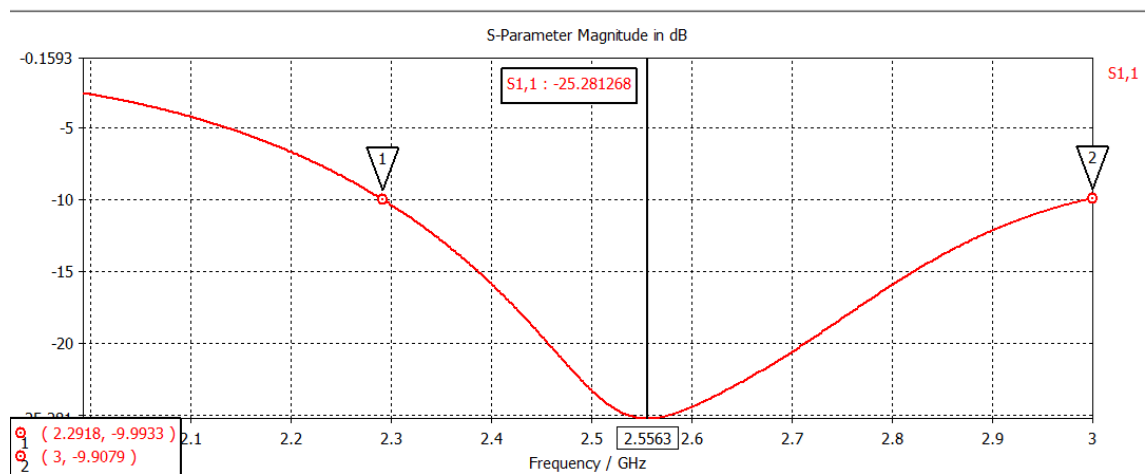


Figura 4.8: Gráfica parámetro S11 del primer parche con borde modificado

También vamos a mostrar la curva de la razón axial para la frecuencia central de la banda en un plano de radiación para comprobar la dirección broadside (perpendicular a la apertura)

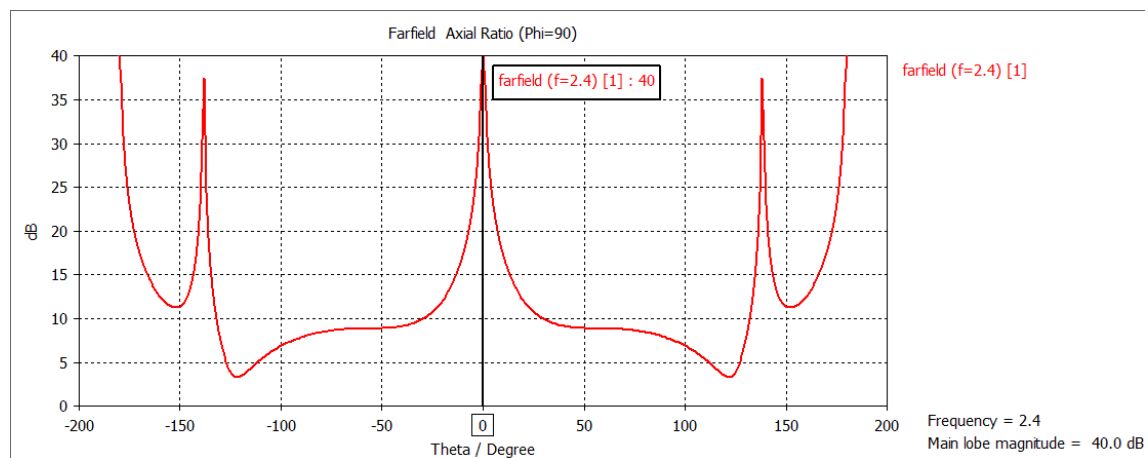


Figura 4.9: Gráfica razón axial del primer parche con borde modificado

Como comentamos anteriormente en el apartado 4.2.1, a parte de las altura de los sustratos, las nuevas

medidas de la antena con respecto al primer parche estudiado en el apartado 4.1 han sido las siguientes. La referencia a las variables se pueden ver en la figura 4.1 y figura 2.2:

L, W	34,17 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	6,7 mm
w	3,35 mm
d	8 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l	3,35 mm

Tabla 4.2: Medidas primer primer parche con borde modificado

Como se puede observar el ancho de banda en adaptación este dentro de los deseado:

$$BW = (3Ghz - 2,2918Ghz)/2,4Ghz = 0,2950 = 29,5\%$$

En cambio el problema que tenemos es que a la frecuencia 2,4 Ghz nos a sido imposible conseguir una buena polarización circular por lo que por lo que descartamos este diseño.

El siguiente diseño que vamos a estudiar es muy parecido al otro pero en vez de quitar un trozo vamos a añadir dos trozos a mitad altura del parche de la figura 4.4:

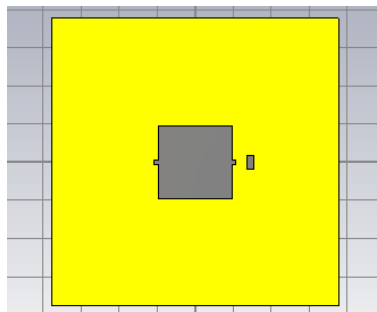


Figura 4.10: Segundo parche con borde modificado

Los parámetros modificados son los mismos que en diseño anterior: el largo y ancho del parche (parámetros L y W de la figura 4.1), el largo y ancho del puerto de alimentación (parámetros l y w de la figura 4.1) y las dimensiones del cuadro a eliminar en el parche (parámetros l de la figura 2.2) . La dimensiones del parche son las siguientes:

L, W	38,25 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	7,5 mm
w	3,75 mm
d	8 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l	2,25 mm

Tabla 4.3: Medidas segundo parche con borde modificado

Tras varias simulaciones estos son los resultados obtenidos del ancho de banda en adaptación son:

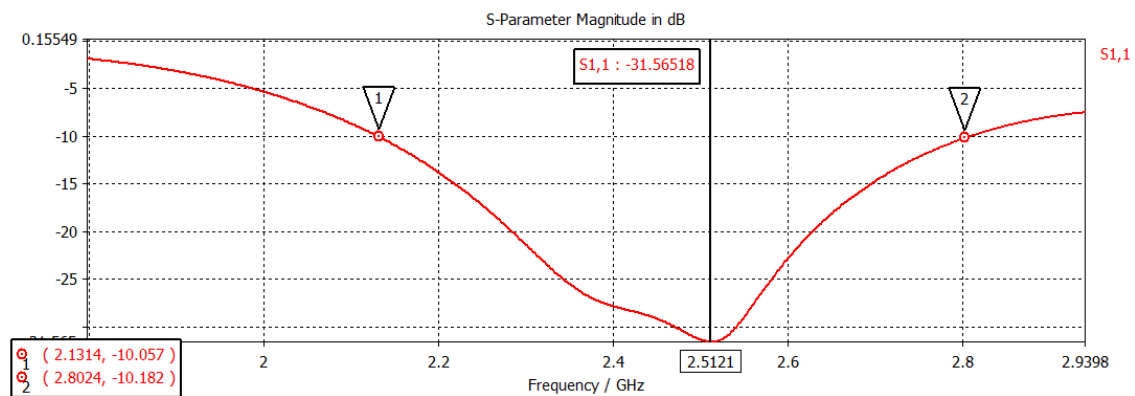


Figura 4.11: Gráfica parámetro S11 del segundo parche con borde modificado

La razón axial a la frecuencia central de este diseño es:

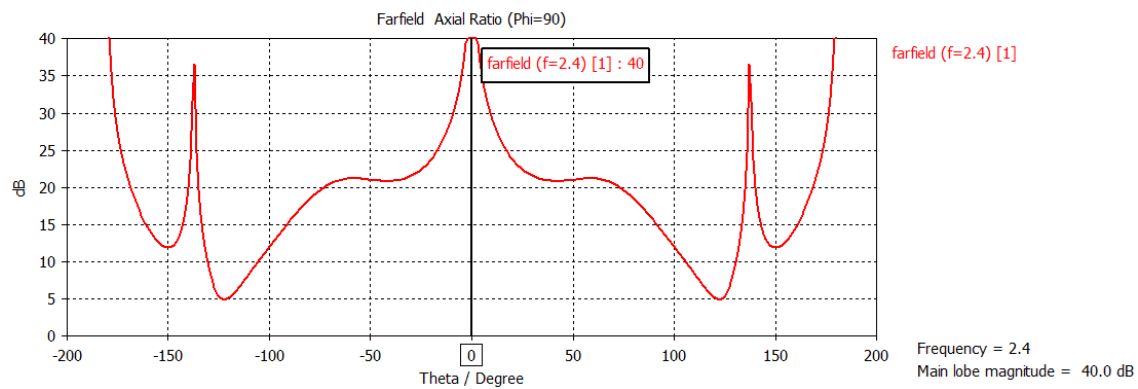


Figura 4.12: Gráfica Razon axial del segundo parche con borde modificado

Con este diseño nos pasa como con el anterior, obtenemos un buen ancho de banda:

$$BW = (2,8024\text{GHz} - 2,1314\text{GHz})/2,4\text{GHz} = 0,2795 = 27,95\%$$

Pero la razón axial es muy mala por lo que también lo descartamos.

4.2.1.2. Parches con esquinas modificados

En este apartado vamos a estudiar tres diseños en los que se van a modificar las esquinas del parche.

Los parámetros que hemos estado modificando para los diseños de parche con esquina modificados han sido: el largo y ancho del parche (parámetros L y W de la figura 4.1), el largo y ancho del puerto de alimentación (parámetros l y w de la figura 4.1) y las dimensiones del la sección a eliminar o añadir en el parche (parámetros l de la figura 2.3)

El primer diseño se le va a eliminar una pequeña parte de las esquinas en forma triangular:

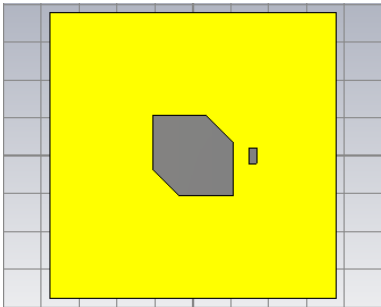


Figura 4.13: Primer parche con esquina modificado

Tras realizar una serie de prueba las dimensiones obtenidas para este diseño son las siguientes:

L, W	42,33 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	6,8 mm
w	3,44 mm
d	8 mm
d _p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l	14,11 mm

Tabla 4.4: Dimensiones primer parche con borde modificado

Los mejores resultados que obtuve con respecto al ancho de banda en adaptación fueron los siguientes:

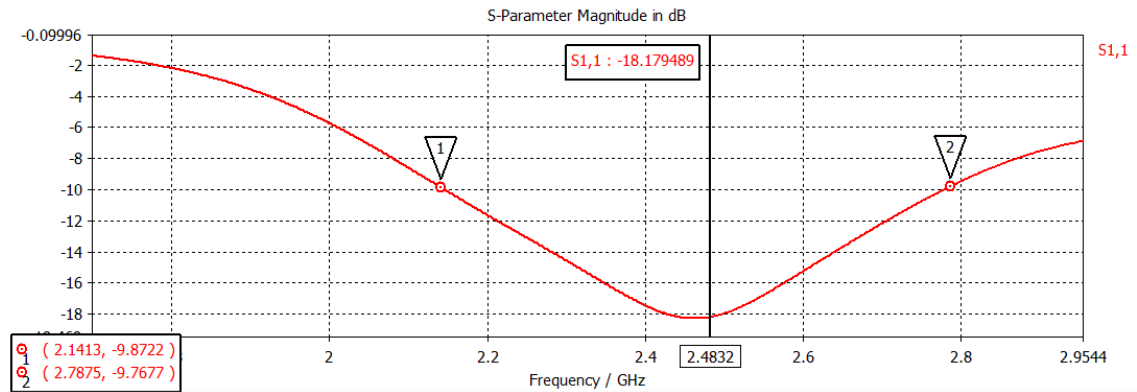


Figura 4.14: Parámetro S11 Primer parche con esquina modificado

Los resultados de la razón axial a la frecuencia central:

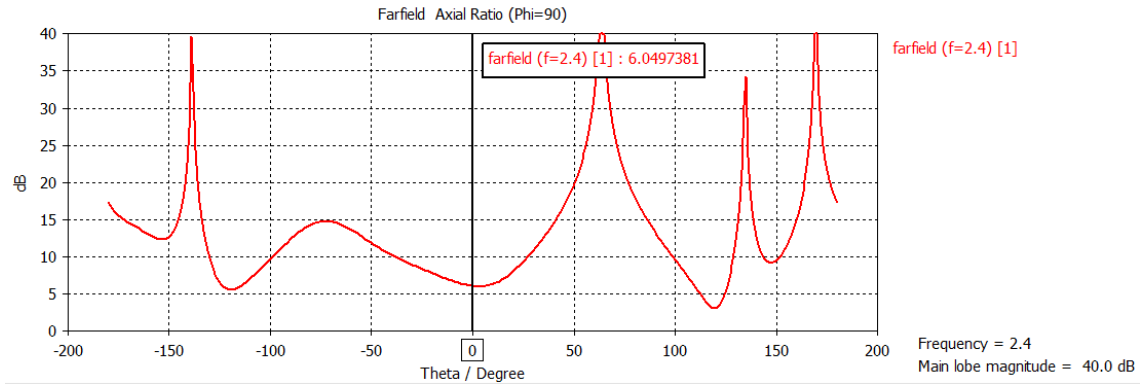


Figura 4.15: razón axial primer parche con esquina modificado

Observamos que el ancho de banda esta dentro de los objetivos marcados:

$$BW = (2,7875\text{Ghz} - 2,1413\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,2692 = 26,92\%$$

Pero la razón axial no esta dentro de los valores especificados. En este diseño la razón axial aumenta conforme aumentamos el corte de las esquinas (parámetro l) hasta tal punto que el diseño ya pierde su forma de antena. Por lo que descartaremos este diseño por el momento.

El siguiente diseño que vamos a analizar vamos a proceder a eliminar un trozo de las esquina en forma rectangular:

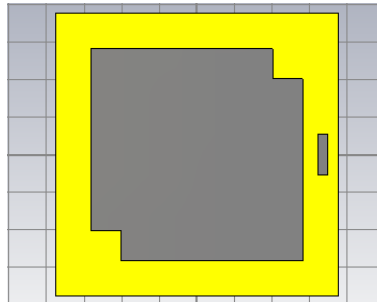


Figura 4.16: Segundo parche con esquina modificado

Las dimensiones del parche resultante tras una serie de simulaciones son:

L, W	112,2 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	22 mm
w	5 mm
d	8 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l	25 mm

Tabla 4.5: Dimensiones segundo parche con borde modificado

Los mejores resultados de las pruebas realizadas para el ancho de banda en adaptación:

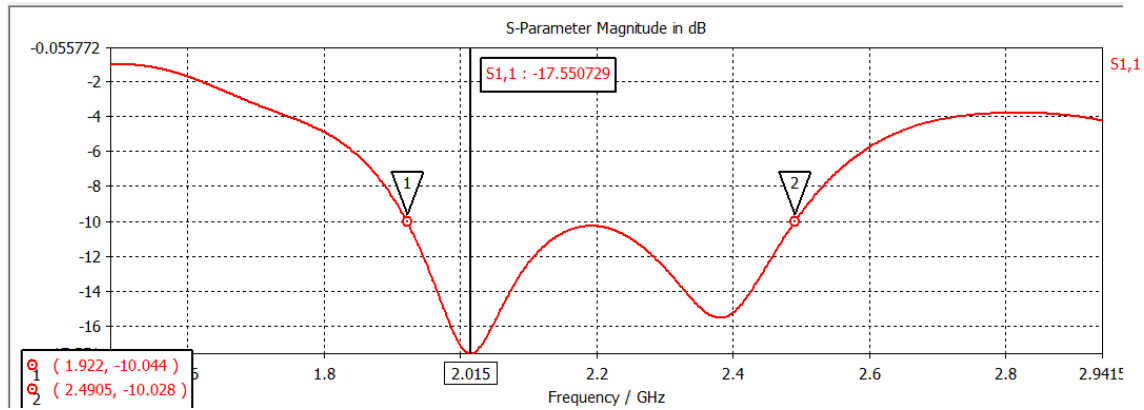


Figura 4.17: Parámetro S11 segundo parche con esquina modificado

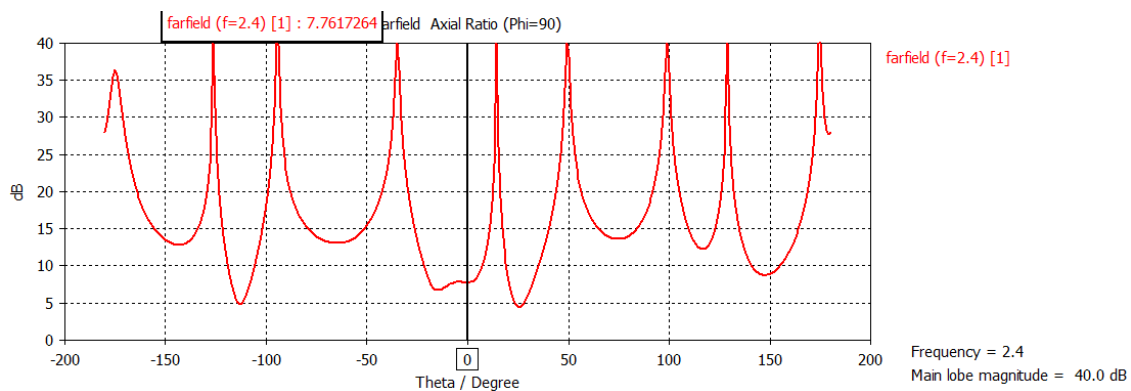


Figura 4.18: razón axial segundo parche con esquina modificado

Observamos que el ancho de banda para este diseño es bueno:

$$BW = (2,4905\text{GHz} - 1,922\text{GHz})/2,4\text{GHz} = 0,2368 = 23,68\%$$

Pero el problema lo tenemos con la razón axial ya que supera los objetivos marcados.

El tercer parche con las esquina modificadas se basa en añadir unos trozos rectangulares en las esquinas:

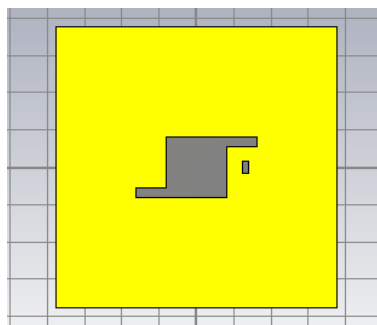


Figura 4.19: Tercer parche con esquina modificado

Las dimensiones del parche de la figura anterior con las que obtenemos los mejores resultados son:

L, W	32,895 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	6,45 mm
w	3,225 mm
d	8 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l mayor	16,125 mm
l menor	5,16 mm

Tabla 4.6: Dimensiones tercer parche con borde modificado

Los resultados del ancho de banda en adaptación:

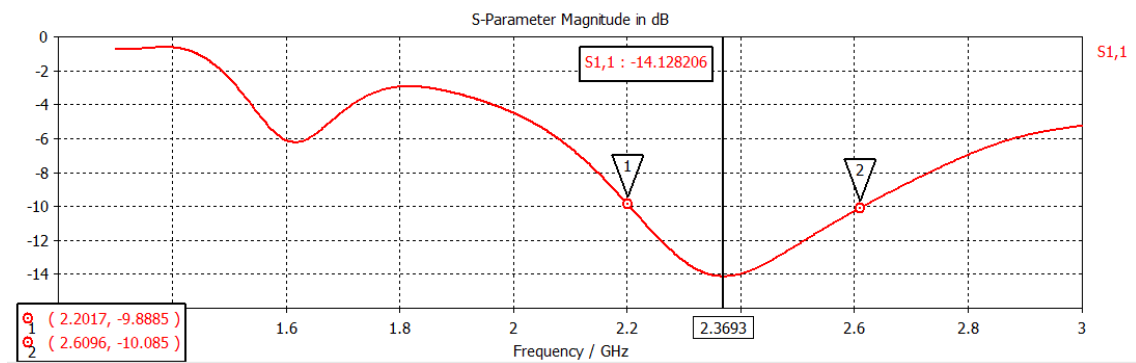


Figura 4.20: Parámetro S11 tercer parche con esquina modificado

La la razón axial a la frecuencia central:

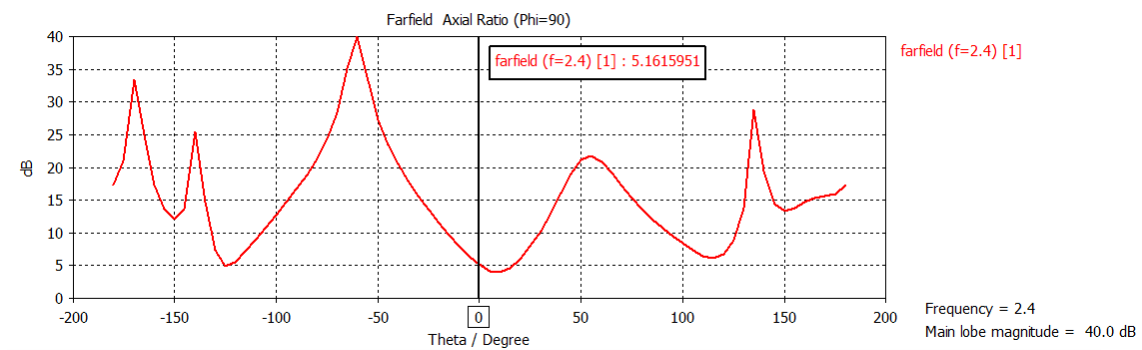


Figura 4.21: razón axial tercer parche con esquina modificado

El ancho de banda obtenido es el siguiente.

$$BW = (2,6096\text{GHz} - 1,2017\text{GHz})/2,4\text{GHz} = 0,1699 = 16,99\%$$

El ancho de banda de este diseño no se cumple por muy poco así como la razón axial esta casi en los primero objetivos que nos hemos marcado.

4.2.1.3. Parche con ranura diagonal

Otra de las maneras de que la antena radie con una polarización circular es introducir una ranura en la diagonal del parche. En este caso modificaremos los mismos parámetros que hemos estado modificando para los diseños anteriores: el largo y ancho del parche (parámetros L y W de la figura 4.1), el largo y ancho del puerto de alimentación (parámetros l y w de la figura 4.1) y las dimensiones de la ranura diagonal (parámetros l y w de la figura 2.4)

El diseño resultante tras diversas pruebas:

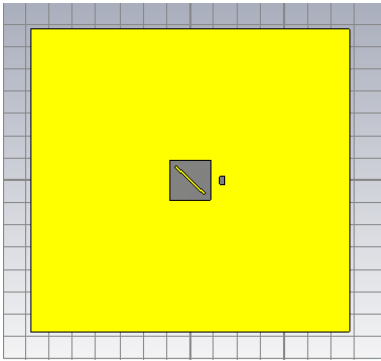


Figura 4.22: Parche con ranura diagonal

Las dimensiones de la figura anterior:

L, W	35,088 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	8,3 mm
w	4,15 mm
d	8 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l ranura	1,72 mm
w ranura	34,4 mm

Tabla 4.7: Dimensiones primer parche con ranura diagonal

Los resultados del ancho de banda de adaptación para este diseño:

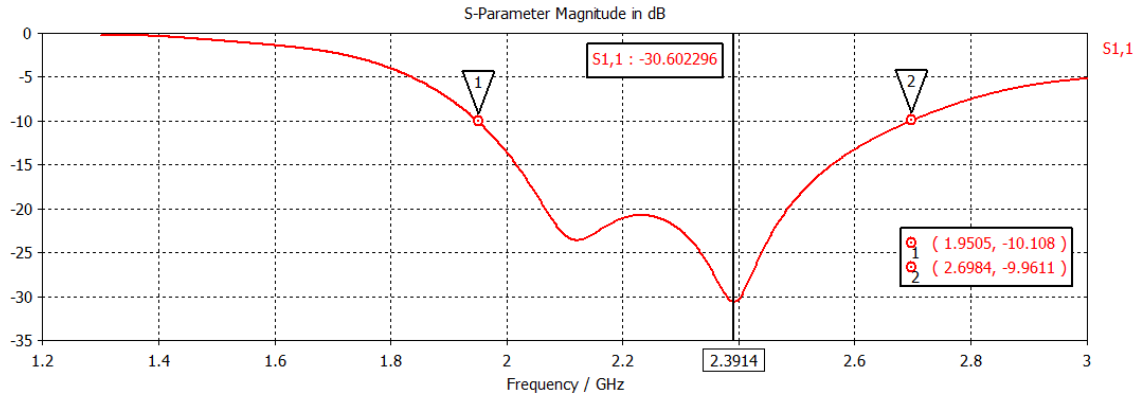


Figura 4.23: Parámetro S11 parche con ranura diagonal

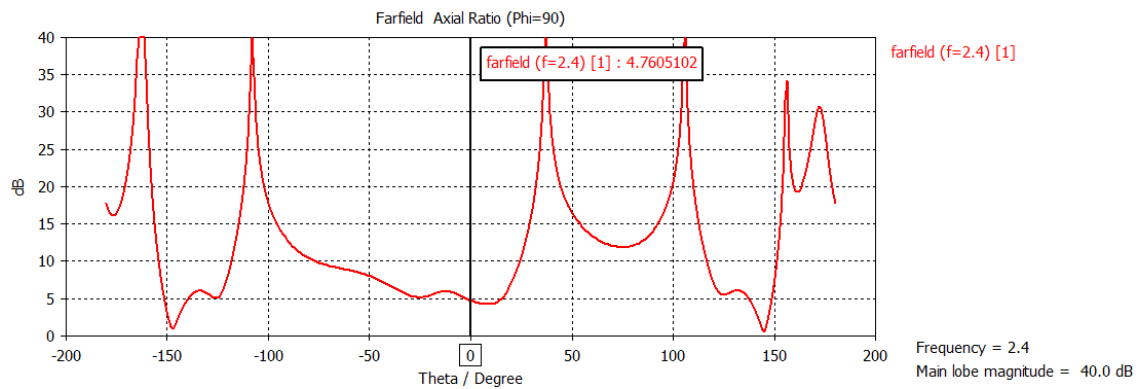


Figura 4.24: razón axial parche con ranura diagonal

El ancho de banda obtenido en este caso es el siguiente:

$$BW = (2,6984\text{Ghz} - 1,9505\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,311625 = 31,16\%$$

Es este caso tenemos muy buen ancho en adaptación de banda incluso mas del esperado.

El problema viene con la polarización circular a la frecuencia de la cual queremos que este adaptada nuestra antena. La razón axial que obtenemos a la frecuencia 2,4 Ghz es de 4,7 dB que esta dentro de nuestros objetivos.

4.2.2. Polarización circular con alimentación de dos puertos

Otra de las maneras de obtener una polarización circular es diseñar la antena con dos puertos y excitarlos con dos señales desfasadas 90 grados entre ellas. El diseño de la antena seria el siguiente:

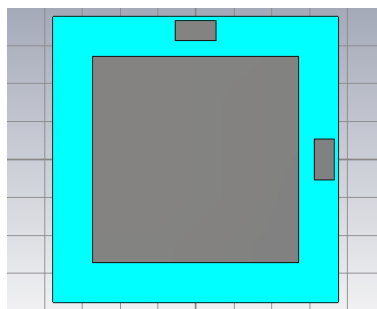


Figura 4.25: Parche con alimentación de dos puertos

Los parámetros que hemos modificado para conseguir este diseños son los mismos que en los diseños anteriores: el largo y ancho del parche (parámetros L y W de la figura 4.1), el largo y ancho del puerto de alimentación (parámetros l y w de la figura 4.1). En este caso contamos con los puertos de alimentación de idénticas dimensiones. Las dimensiones de este diseño son las siguientes:

L, W	108,63 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	21,3 mm
w	10,65 mm
d	8 mm
d _p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm

Tabla 4.8: Dimensiones parche con alimentación de dos puertos

De esta antena obtenemos el siguiente ancho de banda en adaptación:

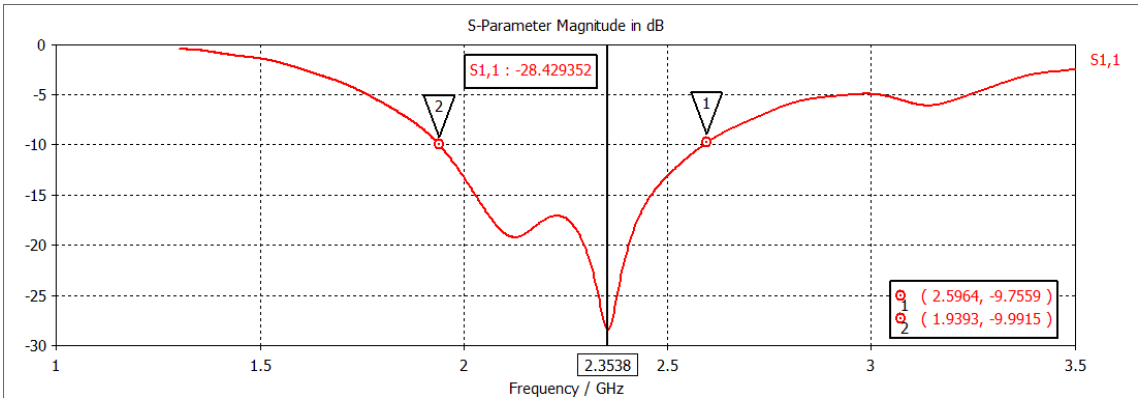


Figura 4.26: Parámetro S11 parche con alimentación de dos puertos

Al tener dos puertos hacemos la prueba de primero desfasar el puerto 2 y después introducir el desfase en le puerto 1. El resultado de esto son las dos siguientes gráficas de la razón axial, ambas a la frecuencia central:

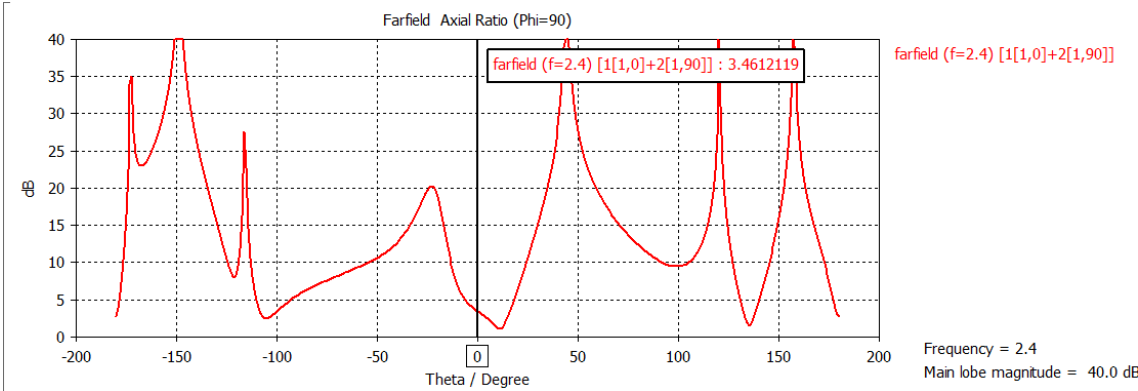


Figura 4.27: razón axial parche con alimentación de dos puertos desfasadas 90 grados

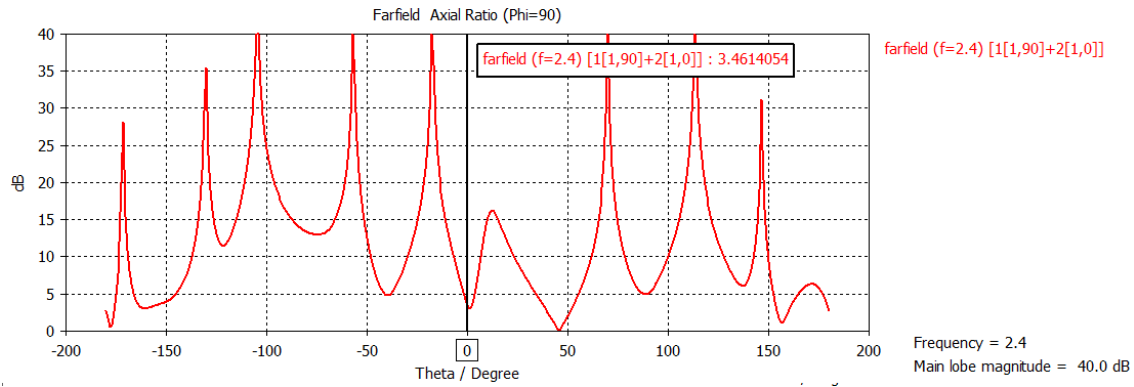


Figura 4.28: razón axial parche con alimentación de dos puertos desfasadas 90 grados

El ancho de banda de este diseño es el siguiente:

$$BW = (2,5842\text{GHz} - 1,9433\text{GHz})/2,4\text{GHz} = 0,2670 = 26,7\%$$

Los datos tanto del ancho de banda como de como de la razón axial están dentro de los rangos deseados y marcados en los objetivos. El punto negativo de este diseño es la necesidad de diseñar otro circuito auxiliar que desfase 90° una de la otra. Las dimensiones de la antena tampoco son un punto a su favor ya que las dimensiones del parche son muy grandes .

4.3. Elección de la topología final y optimización del diseño

De todos los diseños que hemos analizados hasta ahora:

- los dos parches con los bordes modificados descritos en el apartado 4.2.1.1 los descartamos por la mala razón axial
- de los diseños del apartado 4.2.1.2 descartamos los dos primeros también por los malos resultados de la razón axial
- el parche con dos puertos lo descartamos por necesidad de diseñar otro circuito auxiliar que desfase 90° .
- con los parches que nos quedamos con el tercer parche de apartado 4.2.1.2 y el de la ranura diagonal

De estos dos parches elegimos para optimizarlo el tercer parche con esquinas modificadas ya que si fuese necesario modificar la antena una vez construida este modelo sera mas fácil de ajustar en el laboratorio y los resultados son muy parecidos entre ellos.

A partir de ahora en la optimización final del parche elegido vamos a centrarnos mas en la razón axial dentro de la banda de trabajo con lo que extenderemos el estudio a varios puntos frecuenciales para tratar de extender este ancho de banda en razón axial al máximo.

Cambiaremos también las condiciones de contorno en estos casos. Ahora cambiaremos todas las condiciones a 'open' simulando el efecto de un plano de masa y un sustrato finitos.

4.3.1. Primera optimización: aproximación de la alimentación al parche

La primera prueba que vamos ha hacer es aproximar un poco la alimentación al borde del parche. Para ello realizamos diversas pruebas reduciendo las distancia d.

El mejor diseño obtenido tras diversas pruebas es el siguiente:

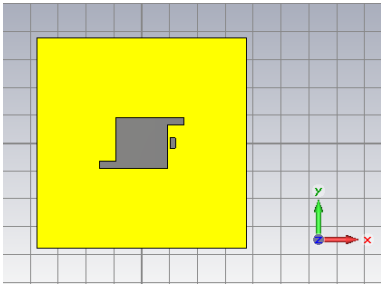


Figura 4.29: Primera optimización tercer parche con esquina modificado

Los parámetros modificados para este diseños son los mismos que mencionamos en el apartado 4.2.1.2 y también la distancia entre el borde del parche y el puerto de alimentación (representado por la variable d). Las dimensiones de este diseño son las siguientes:

L, W	36,72 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	7,2 mm
w	3,6 mm
d	2 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l mayor	11,52 mm
l menor	5,4 mm

Tabla 4.9: Dimensiones primera optimización tercer parche con borde modificado

El mejor resultado obtenido en ancho de banda de adaptación es el siguiente:

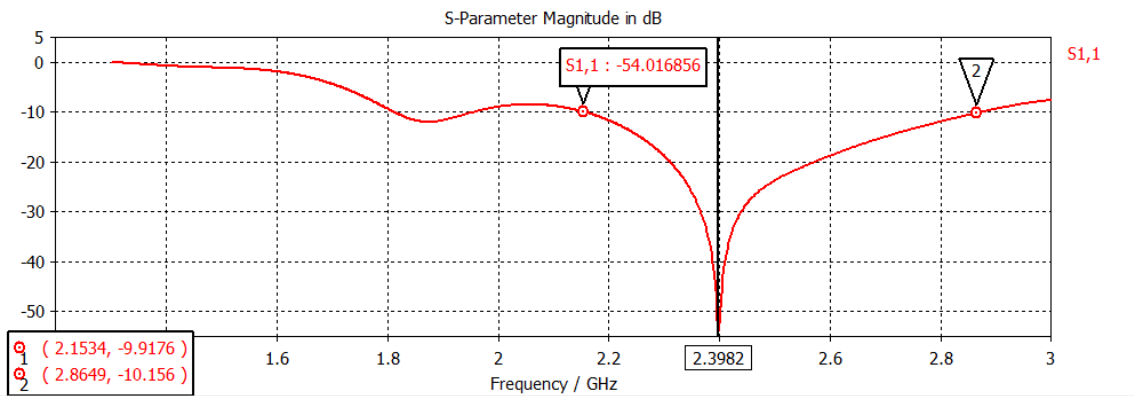


Figura 4.30: Parámetro S11 primera optimización tercer parche con esquina modificado

A estas alturas del proyecto nos planteamos restringir más el rango de variación de la razón axial pasando a un limite de 3dB

Para encontrar una ancho de banda de la razón axial dentro del rango de adaptación de la antena hacemos un estudio del campo lejano a diversas frecuencias. Los resultados de las mejores razones axiales son las siguientes:

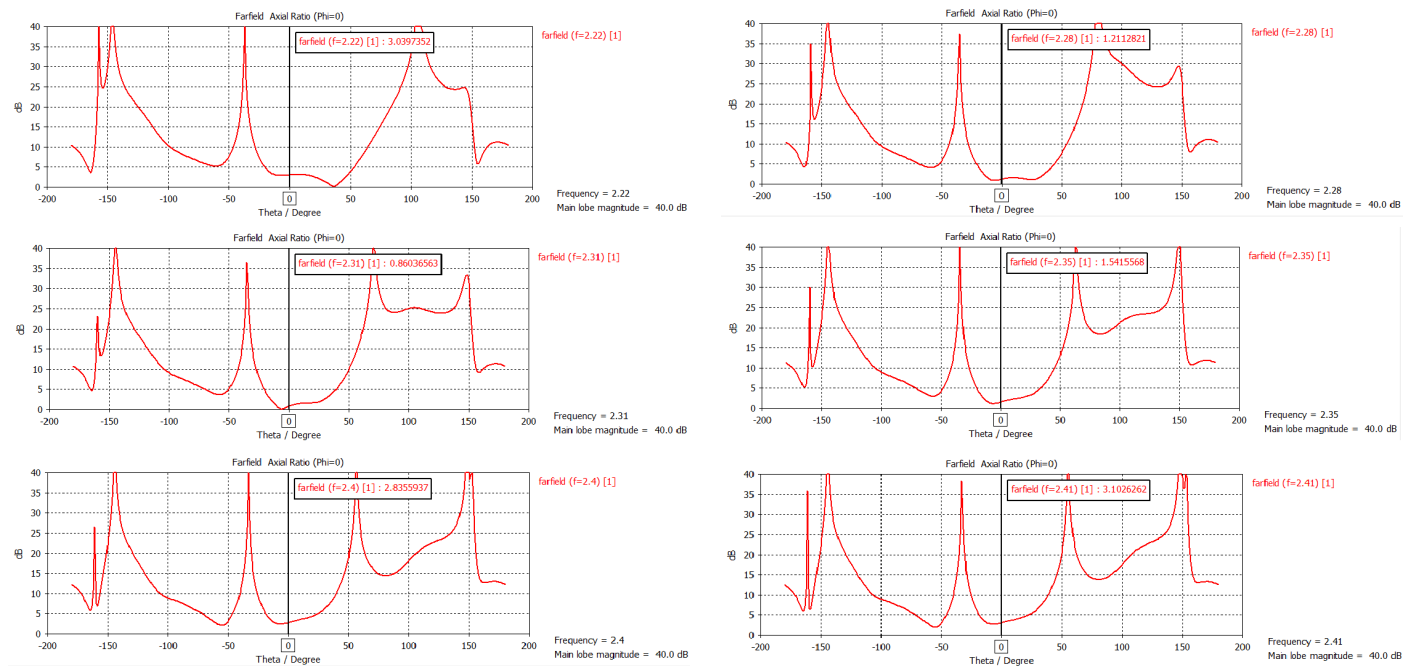


Figura 4.31: razón axial a diversas frecuencias primera optimización

Elegimos representar el diagrama de radiación a la frecuencia 2,31 Ghz que es donde hemos obtenido una muy buena razón axial, también representaremos las coordenadas E_θ y E_ϕ tanto del plano XZ (plano E) y del plano YZ (plano H).

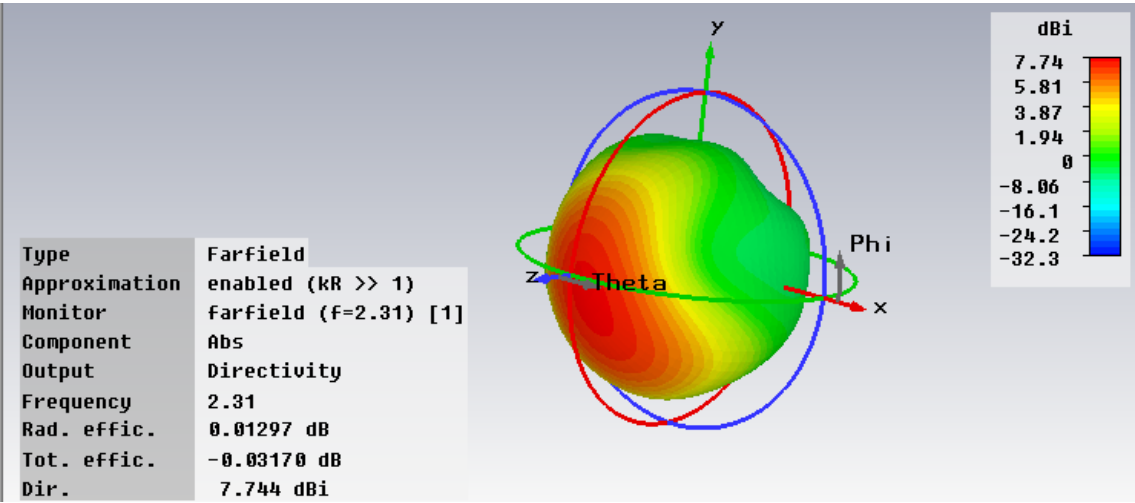


Figura 4.32: Diagrama de radiación en 3D primera optimización tercer parche con esquina modificado 2,31 Ghz

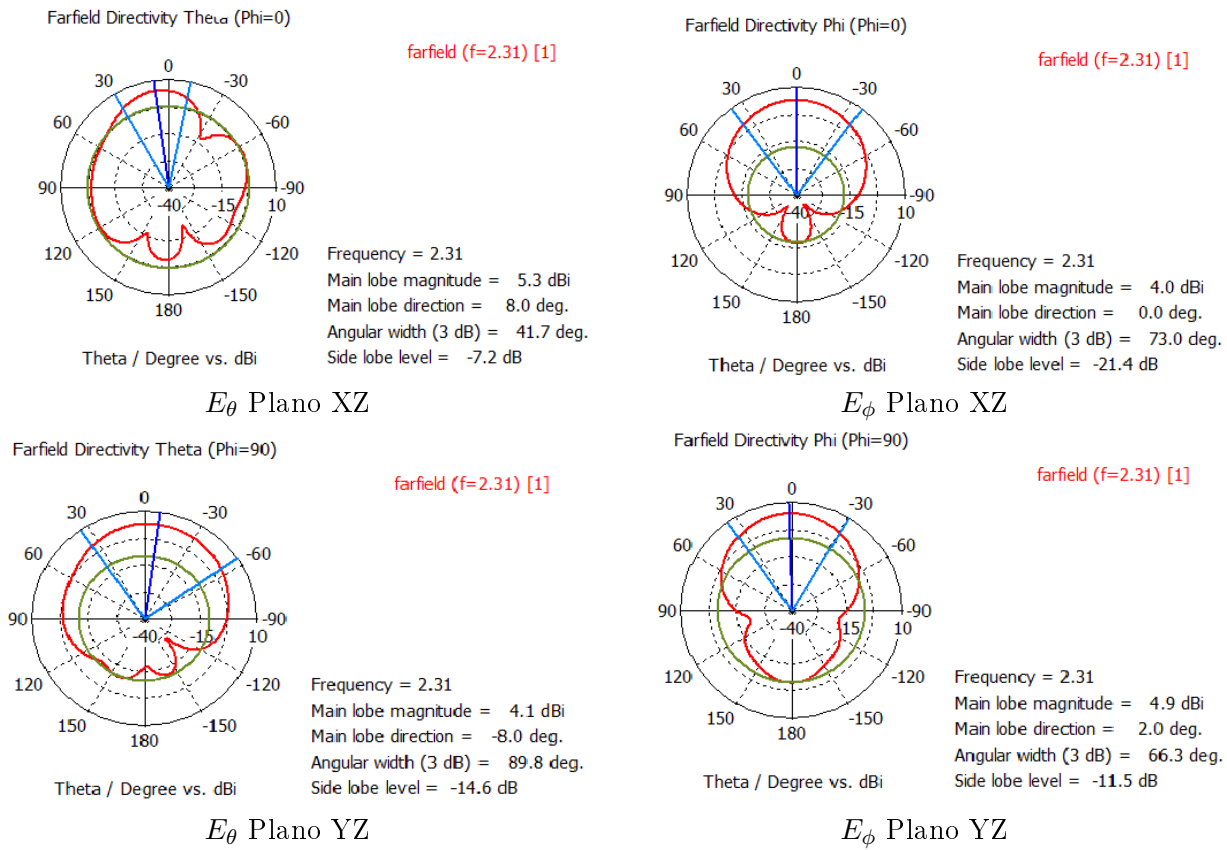


Figura 4.33: Coordenadas E_θ y E_ϕ en plano XZ y plano YZ a 2,31 Ghz primera optimización

En la siguiente gráfica mostraremos los diversos resultados obtenidos con el estudio de la razón axial con respecto a la frecuencia. Marcaremos también el límite de los 3db para apreciar el BW. Para la realización de esta gráfica usamos MatLab:

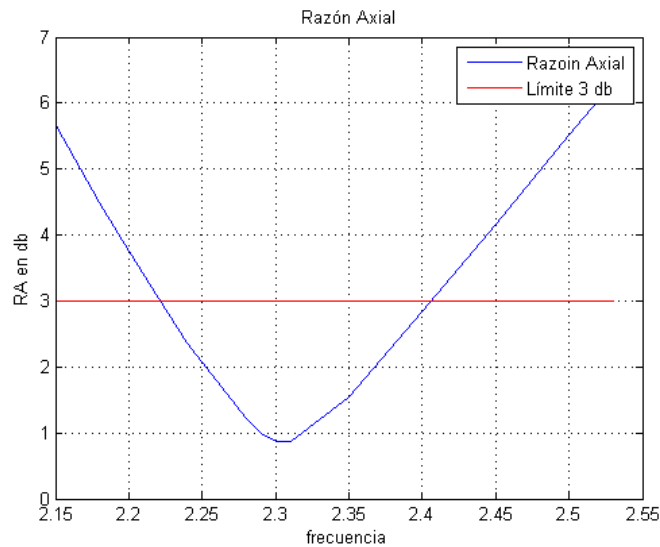


Figura 4.34: BW de la razón axial en la primera optimización

De los estudios realizados en este caso obtenemos los siguientes valores:

- El ancho de banda en adaptación:

$$BW = (2,8649\text{Ghz} - 2.1534\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,2964 = 29,64\%$$

- El ancho de banda para la razón axial menor de 3 db:

$$BW = (2,41\text{Ghz} - 2.22\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,0791 = 7,9\%$$

4.3.2. Segunda optimización: introducción de elementos con perdidas

El siguiente paso que introducimos es el cambio de elementos. Ahora introduciremos las perdidas de los elementos para que las simulaciones parezcan mas realistas. Cambiaremos el PEC utilizado en los anteriores diseños para el plano de masa y el parche por cobre e introduciremos el valor de las perdidas para la capa FR-4:

- Para la fibra de vidrio usaremos la capa FR-4, fibra de vidrio con una permitividad eléctrica de $\epsilon = 4.3$ y $\tan(\delta) = 0.025$
- Usaremos cobre para el plano de masa y el parche con una conductividad $5.8\text{e}+007$ S/m.

Otro de los cambios introducidos en este diseño es el cambio del puerto, ya que se cambia el puerto discreto usado en los anteriores casos un puerto guía onda que sera el que introduciremos a la hora de construirlo. Este tipo de cambios también afecta a los resultados por lo que debemos de volver a realizar una optimización mediante el ajuste manual distintas variables del diseño hasta llegar a un resultado planteado en los objetivos.

El diseño obtenido es el siguiente:

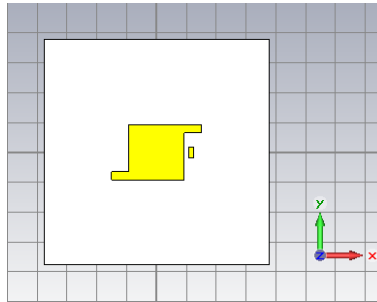


Figura 4.35: Segunda optimización tercer parche con esquina modificado

tras modificar las mismas variables mencionadas en el apartado anterior, las dimensiones de esta antena son las siguientes:

L, W	36,72 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	7,2 mm
w	3,6 mm
d	2 mm
d_p	0,9 mm
h	15 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l mayor	11,52 mm
l menor	5,4 mm

Tabla 4.10: Dimensiones segunda optimización tercer parche con borde modificado

Los mejores resultados obtenidos son los siguientes:

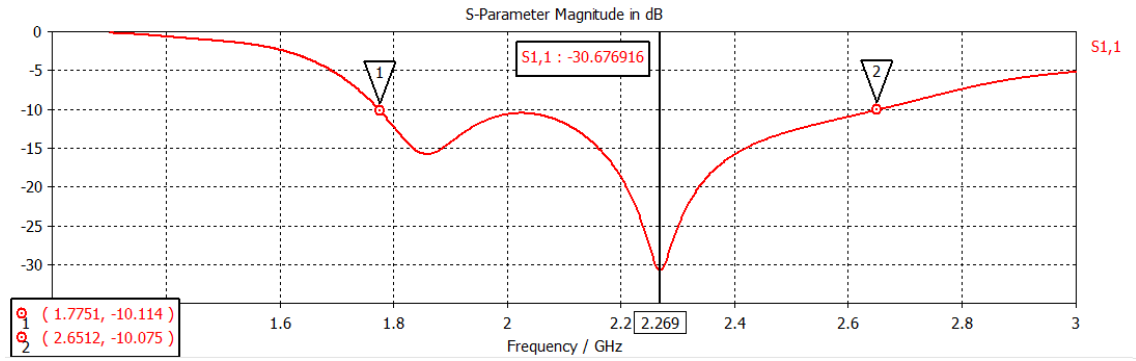


Figura 4.36: Parámetro S11 segunda optimización tercer parche con esquina modificado

Como en el caso anterior aquí también vamos a hacer un estudio del campo lejano a diversas frecuencias para encontrar un ancho de banda en la razón axial por debajo de los 3db.

Las diversas pruebas realizadas nos llevan a los siguientes resultados del ancho de banda de la razón axial:

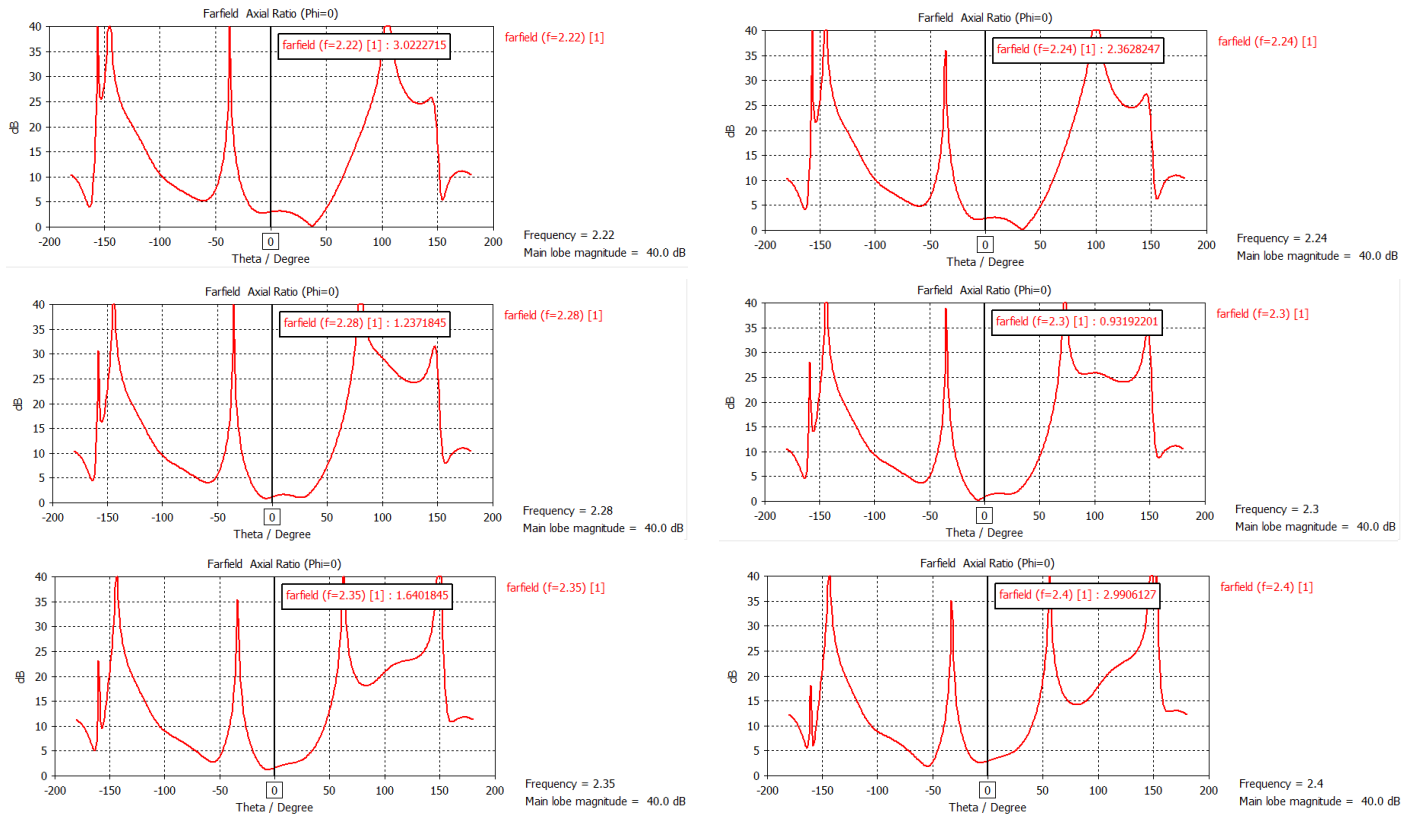


Figura 4.37: razón axial a diversas frecuencias segunda optimización

Elegimos representar el diagrama de radiación a la frecuencia 2,30 Ghz que es donde hemos obtenido una razón axial muy buena, también representaremos las coordenadas E_θ y E_ϕ tanto del plano XZ (plano E) y del plano YZ (plano H).

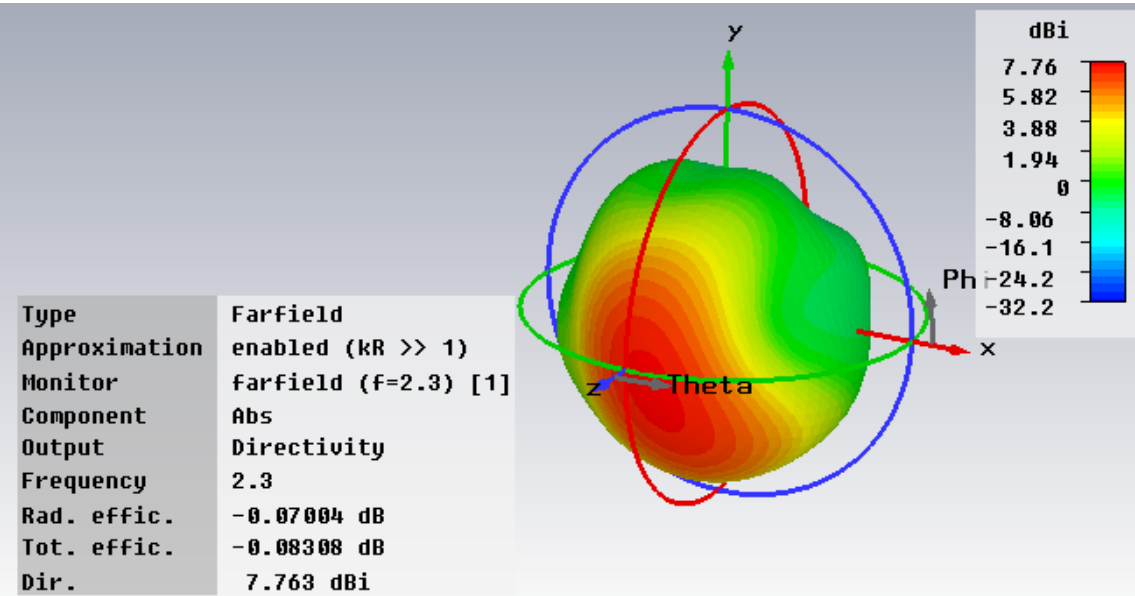


Figura 4.38: Diagrama de radiación en 3D segunda optimización tercer parche con esquina modificado 2,3 Ghz

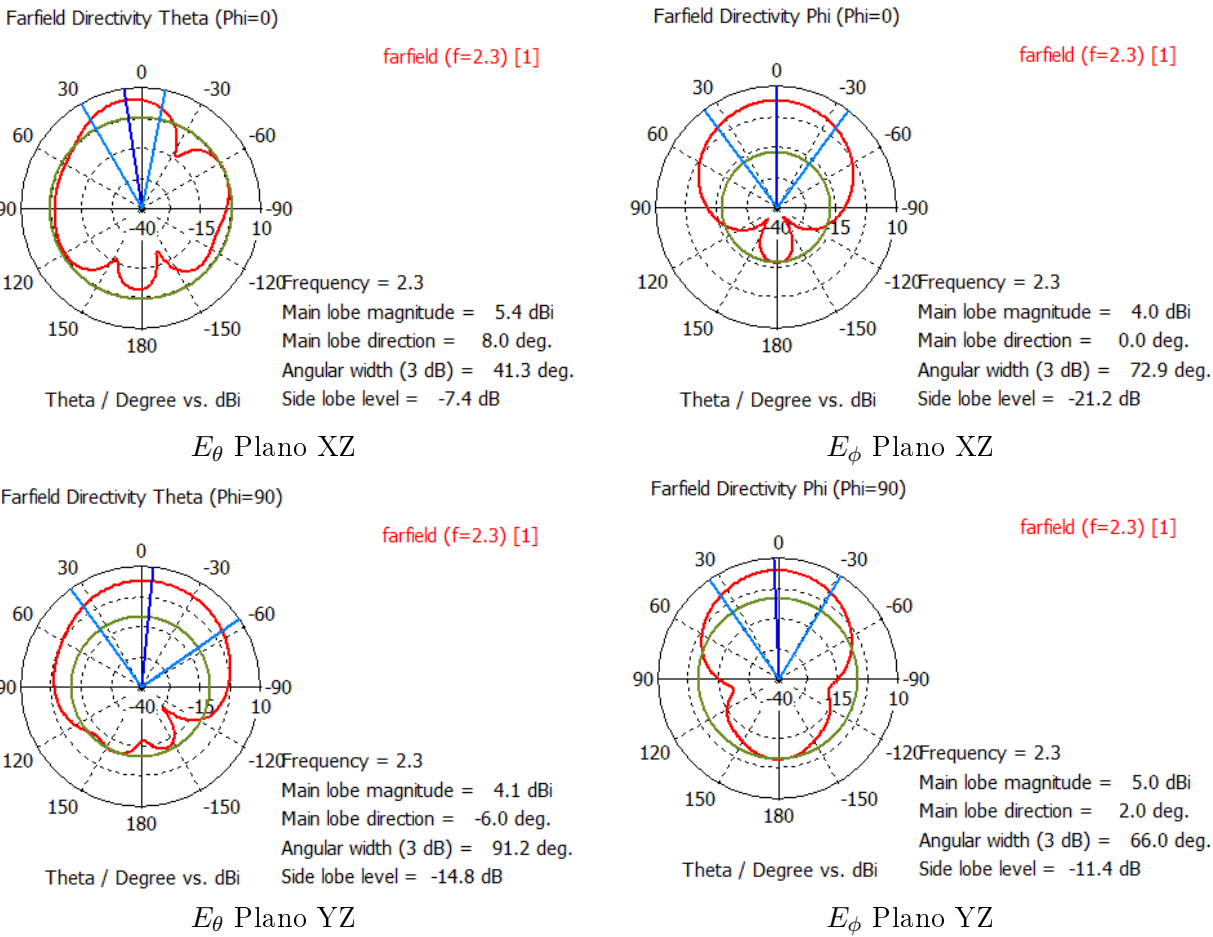


Figura 4.39: Coordenadas E_θ y E_ϕ en plano XZ y plano YZ a 2,3 Ghz segunda optimización

La gráfica de la razón axial frente a la frecuencia en este caso es la siguiente:

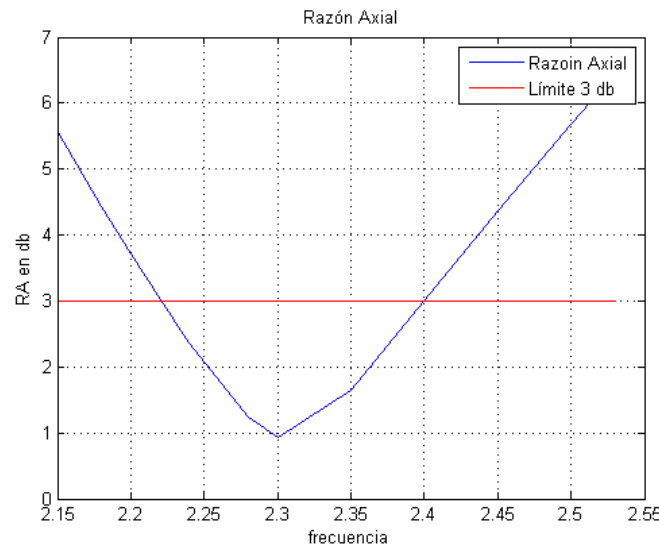


Figura 4.40: BW de la razón axial en la segunda optimización

De los estudios realizados en este caso obtenemos los siguientes valores:

- El ancho de banda en adaptación:

$$BW = (2,6512\text{GHz} - 1,7751\text{GHz})/2,4\text{GHz} = 0,3650 = 36,5 \%$$

- El ancho de banda para la razón axial menor de 3 db:

$$BW = (2,4\text{GHz} - 2.22\text{GHz})/2,4\text{GHz} = 0,075 = 7,5 \%$$

4.3.3. Última optimización: introducción de elementos con pérdidas

Al llegar a este punto del proyecto nos damos cuenta que tenemos una pequeña limitación a la hora de fabricar la antena, la altura máxima conductor central del coaxial es 15mm y en nuestro diseño ya solo la altura de la espuma es 15mm. El siguiente caso sera con una altura de la espuma un poco menor, concretamente de 13mm y con los materiales con pérdidas que usamos para la segunda optimización. del conductor central del coaxial es 15mm y en nuestro diseño ya solo la altura de la espuma es 15mm. El siguiente caso sera con una altura de la espuma un poco menor, concretamente de 13mm y con los materiales con pérdidas que usamos para la segunda optimización. del conductor central del coaxial es 15mm y en nuestro diseño ya solo la altura de la espuma es 15mm. El siguiente caso sera con una altura de la espuma un poco menor, concretamente de 13mm y con los materiales con pérdidas que usamos para la segunda optimización.

El diseño resultante de esta prueba es el siguiente:

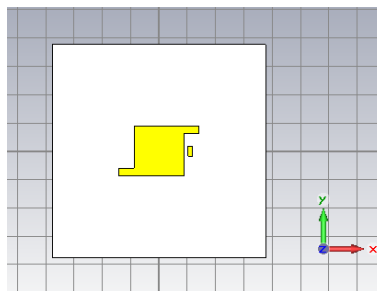


Figura 4.41: Última optimización tercer parche con esquina modificado

Modificando los mismos parámetros que ne apartado 4.3.1, las dimensiones resultantes son:

L, W	36,72 mm
Plano de masa	150x150 mm
l	6,8 mm
w	3,4 mm
d	1,5 mm
d_p	0,9 mm
h	13 mm
t	1,5 mm
t1	0,5 mm
Altura parche	0,05 mm
l mayor	10,88 mm
l menor	5,1 mm
Radio Cable Coaxial	1,035 mm

Tabla 4.11: Dimensiones última optimización tercer parche con borde modificado

La adaptación de este diseño es la siguiente:

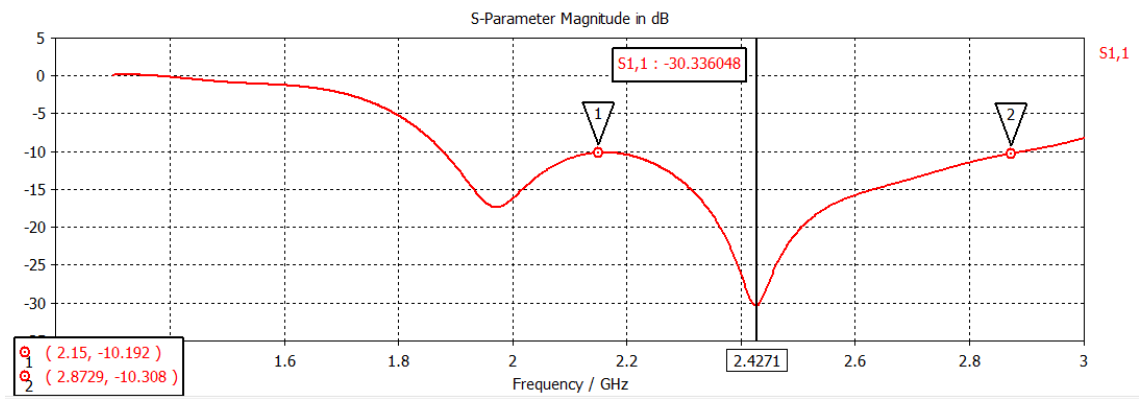


Figura 4.42: Parámetro S11 última optimización tercer parche con esquina modificado

Como en los casos anteriores aquí también vamos a hacer un estudio del campo lejano a diversas frecuencias para encontrar un ancho de banda en la razón axial por debajo de los 3db.

En la siguiente tabla podemos ver los resultados:

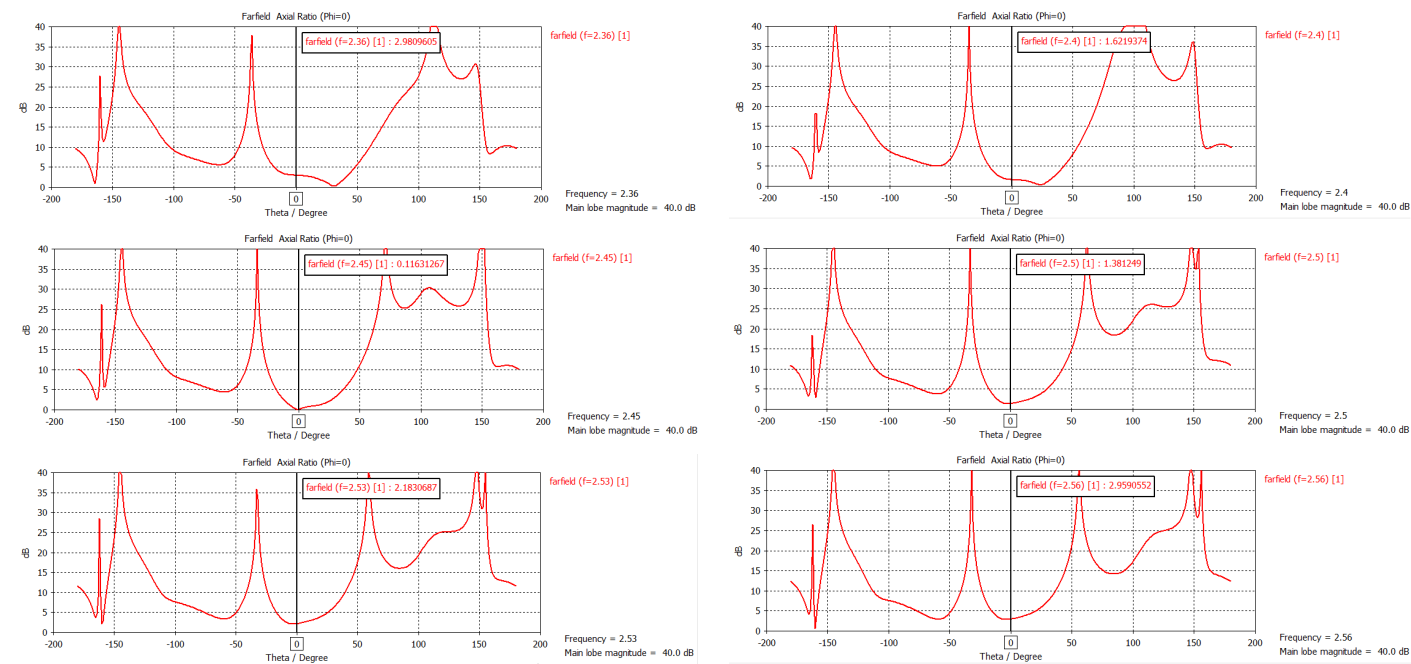


Figura 4.43: razón axial a diversas frecuencias última optimización

Como en los casos anteriores vamos a representar las coordenadas E_θ y E_ϕ tanto del plano XZ (plano E) y del plano YZ (plano H) de la frecuencia 2,45 Ghz que es donde hemos obtenido muy buena razón axial.

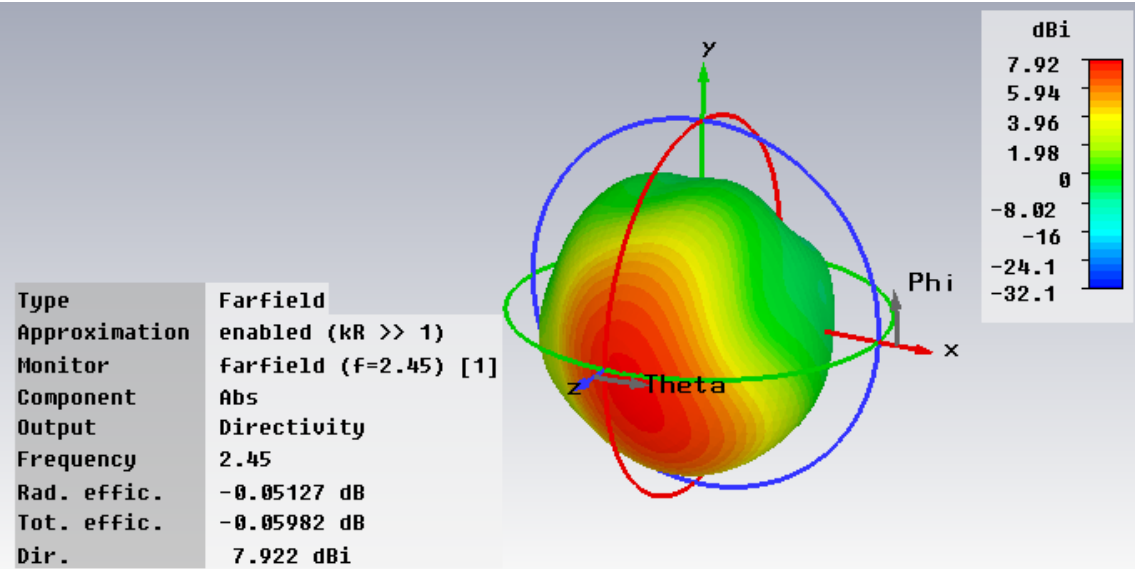
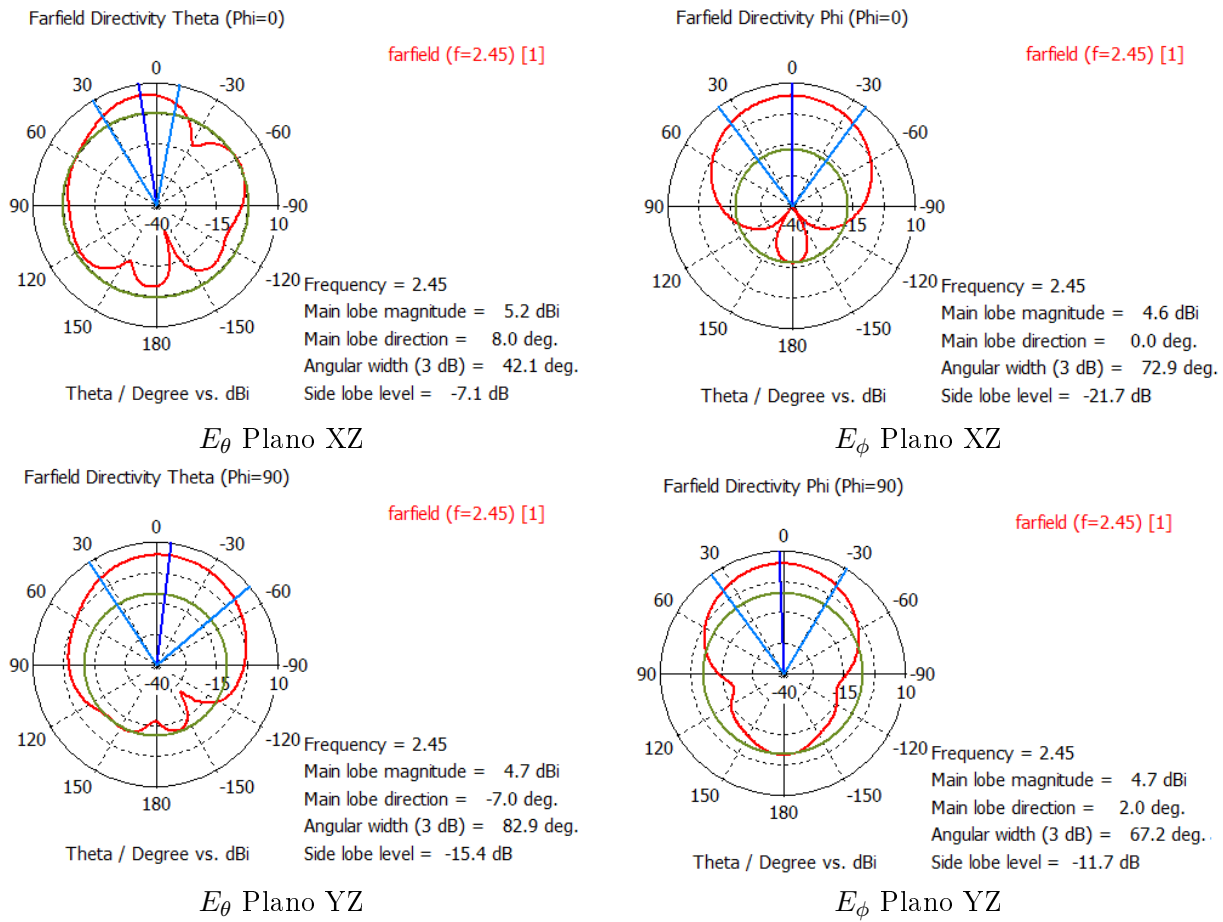


Figura 4.44: Diagrama de radiación en 3D última optimización tercer parche con esquina modificado 2,45 Ghz

Figura 4.45: Coordenadas E_θ y E_ϕ en plano XZ y plano YZ a 2,45 Ghz última optimización

Como en los caso anteriores mostramos la gráfica de la razón axial frente a frecuencia para poder apreciar le BW de la razón axial:

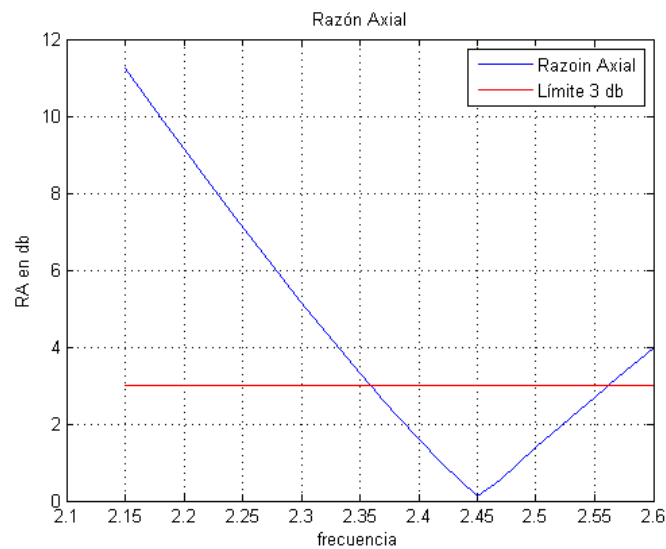


Figura 4.46: BW de la razón axial en la ultima optimización

De los estudios realizados en este caso obtenemos los siguientes valores:

- El ancho de banda en adaptación:

$$BW = (2,8729\text{Ghz} - 2,15\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,3012 = 30,12 \%$$

- El ancho de banda para la razón axial menor de 3 db:

$$BW = (2,56\text{Ghz} - 2.36\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,0833 = 8,3 \%$$

Capítulo 5

Construcción del prototipo

5.1. Medidas

Después de todos estos diseños enviamos a construir el diseño al taller de la Oficina Técnica de la Escuela Politécnica Superior de la universidad Carlos III de Madrid el último modelo con las dimensiones obtenidas la tabla 4.11 . El diseño enviado a laboratorio es el siguiente:

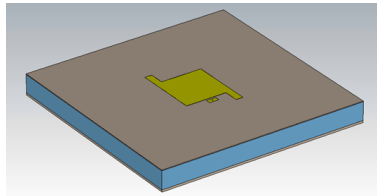


Figura 5.1: Frontal diseño enviado a construir

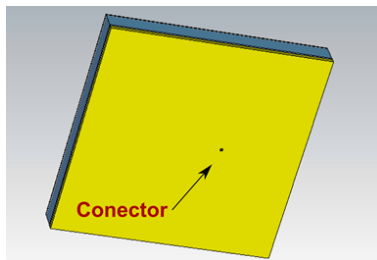


Figura 5.2: Trasera diseño enviado a construir

La antena es compuesta de tres sustratos apilados:

- Una capa de FR4 de espesor $h=1.5\text{mm}$ (en marrón) cuya parte de abajo hace de plano de masa (va completamente metalizada). La capa de arriba de este sustrato no tiene ninguna metalización. En la parte de abajo va soldado un conector coaxial SMA de antena (de los de hilo central largo).
- Una capa de espuma de $h=13\text{ mm}$ que separa el sustrato anterior del siguiente (va en azul claro) y que se consigue con dos espumas de 10mm y 3mm apiladas.
- Un parche y una metalización adicional que van fotograbados sobre sustrato FR4 de espesor $h=0.5\text{mm}$ (en marrón, arriba). En la cara inferior de este sustrato (la que va en contacto con la espuma), no hay ninguna metalización. En el centro de la metalización rectangular pequeña va soldado el hilo central del conector SMA. El cuerpo del conector va soldado al plano de masa por abajo.

El resultado obtenido en el laboratorio es el siguiente:

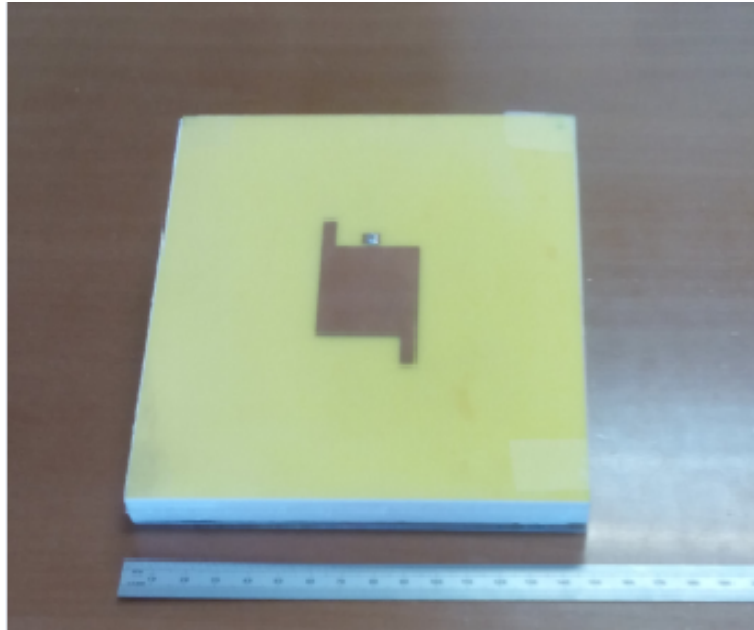


Figura 5.3: Frontal diseño construido

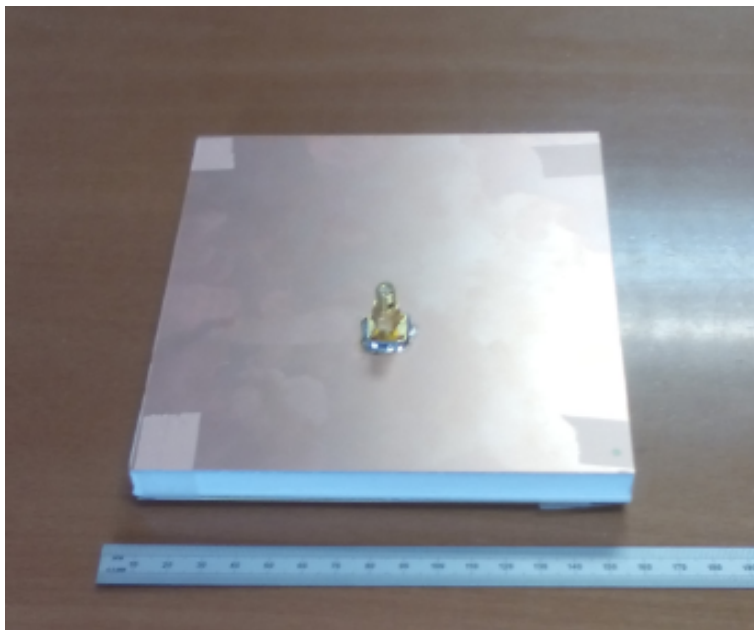


Figura 5.4: Trasera diseño construido

Las pruebas realizadas en los laboratorios de la Universidad Carlos III de Madrid con el equipo AGILENT 8753E S-parameter Network Analyzer nos dan una serie de valores con los cuales construimos las siguientes gráficas en MatLab para comparar los datos del ancho de banda en adaptación obtenidos en la simulación con el construido:

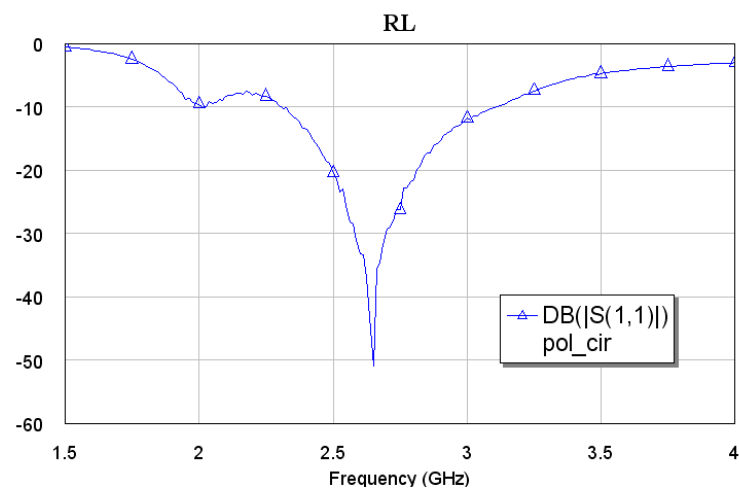


Figura 5.5: Adaptación obtenida en el laboratorio

Capítulo 6

Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1. Conclusiones

Uno de los objetivos planteados era conseguir diseñar y construir una antena de parche con un gran ancho de banda en adaptación por debajo de los -10db y que dentro de ese ancho de banda radiara con una polarización circular.

Para llegar a esto empezamos nuestro diseño con una antena que nos proporcionaba un gran ancho de banda. Esta antena se caracterizaba sobre todo en el diseño del puerto de alimentación, el cual no estaba directamente conectado al parche sino a una pequeña distancia del borde del parche. Esta característica junto a la altura de la espuma es la que nos permitía obtener un gran ancho de banda en adaptación.

Las siguientes simulaciones las centramos en obtener la polarización lineal. Para ello intentamos una serie de diseño: uno con la excitación de la antena mediante dos puertos con modos ortogonales entre ellos y desfase de 90 grados, y otro con la excitación de un solo puerto pero añadiendo o eliminado unas muescas al parche. Para llegar a la elección de nuestro diseño realizamos una serie de pruebas modificando las medidas del largo y ancho tanto del parche como el del puerto de alimentación. De todas estas alternativas, descartamos la de la alimentación de los dos puertos por la necesidad de construir un circuito desfasador. De las alternativas con alimentación de un solo puerto, nos quedamos con la que se añaden unas muescas rectangulares ya que era un diseño que nos daba buenos resultados tanto en adaptación como en polarización así como nos hubiese resultado mas fácil modificarla una vez construida.

Después de haber elegido el diseño que mas hemos creído oportuno nos dispusimos a optimizar los resultados mediante el cambio de los materiales a materiales con perdidas (mas cercanos a los materiales que usamos en la construcción) y el cambio de puerto por el de un cable coaxial. Decidimos probar cambiar la distancia entre el puerto y la antena ya que en la antena que diseñamos con un gran ancho de banda esta entrada en una frecuencia menor. Este cambio nos proporciona unos valores mucho mejores tanto en ancho de banda como en razón axial. También tuvimos una limitación por parte de la altura de la sonda que íbamos a usar en la construcción ya que esta era mas corta que la altura total del parche. Las siguientes simulaciones nos permitió observar en que influida la altura de la antena a nuestros resultados. A medida que reducimos la altura de la espuma pudimos ver como el ancho de banda en adaptación se reducía pero los valores de la razón axial como su ancho mejoraban. Esto es debido que la sonda coaxial al ser mas corta introduce menos interferencia en la radiación.

Tras la construcción del prototipo de la antena y los resultados que hemos recogido de la prueba se pudo observar en la figura 5.5 el siguiente ancho de banda aproximado en adaptación

$$BW = (3,1\text{Ghz} - 2,3\text{Ghz})/2,4\text{Ghz} = 0,3333 = 33.33\%$$

Comparado con el que obtuvimos en el laboratorio es ligeramente superior los obtenidos con la simulación de CST (aproximadamente un 3%) lo que si notamos es que la frecuencia central esta algo mas elevada en el resultado del laboratorio que los resultados obtenidos en las simulaciones.

En la figura 5.5 se puede ver que la frecuencia esta mas centrada en los 2.6 Ghz mientras que en la simulación nos la encontramos mas cercana a la frecuencia 2.4Ghz. Las medidas realizadas en el laboratorio no lo has hemos medido en cámara anecoica, esto introduce un mayor margen de error en los resultados. Podemos concluir que las medidas del laboratorio confirman los resultados esperados en la simulación, al menos para el caso de las pérdidas de retorno

Los resultados obtenidos en las diversas simulaciones como en el laboratorio se puede llegar a concluir que se puede conseguir que la antena radie con polarización circular en una franja considerable del ancho de banda en adaptación y todo esto mediante la alimentación de un solo puerto y modificación de las dimensiones y forma de la antena.

6.2. Futura líneas de investigación

Como posibles futuras investigaciones con este diseño se podría realizar la caracterización experimental de la radiación en una cámara anecoica para obtener unos resultados mas precisos

También se podría probar otro tipo de perturbaciones para ver si se llega resultados similares .

Otra de las cosas que se observa en la figura 5.5 es que por muy poquito se aproxima a otra banda de frecuencia por debajo de los -10db, seria la banda de los 2 Ghz. Se podría hacer un estudio con la altura de la espuma que simula el vacío un poco mas grande, de unos 14 mm para ver si conseguimos incluir otra banda mas en adaptación y verificar como se comportaría el ancho de banda con respecto a la razón axial.

Las dimensiones del plano de masa es otro factor que se podría analizar. En nuestros estudios hemos usado siempre las mismas dimensiones aunque algunas veces los mejores resultados de las simulaciones nos han dado una antena muy grande. Se podría realizar un estudio de la adaptación y razón axial con unas medidas menores del plano de masa ya que seguramente este cambio se vera deteriorada polarización circular.

Capítulo 7

Presupuesto

1. Autor	
FRANCISCO JAVIER ROIG DÍAZ	
2. Departamento	
Teoría de la señal y comunicaciones	
3. Descripción del trabajo de Fin de Grado	
<ul style="list-style-type: none">Título: DISEÑO DE UNA ANTENA DE PARCHE DE BANDA ANCHA CON POLARIZACIÓN CIRCULARDuración: 5 meses	
4. Presupuesto total	
Coste total	17.501,71 €
5. Desglose presupuestario	

Ingeniero Senior	4.166,67 €	3.024,66 €	3 meses	9.073,97 €
Ingeniero Junior	1.833,33 €	1.514,18 €	5 meses	7.570,90 €
Coste total				16.644,87 €
*Retención del IRPF y Seguridad Social				

EQUIPOS				
Descripción	Coste	Dedicación	Periodo de depreciación	Coste de amortización **
Ordenador Portátil	656,00 €	6 meses	60 meses	65,60 €
Licencia CST Microwave Studio	2.499,00 €	6 meses	60 meses	249,90 €
Licencia MATLAB	2.000,00 €	2 meses	60 meses	66,67 €
Analizador de redes Agilent 8753E	5.171,83 €	0.25 mes	60 meses	21,55 €
Coste total				403,72 €

**Fórmula para el cálculo de la amortización:

$$\frac{\text{Coste} \times \text{Dedicación}}{\text{Periodo de depreciación}}$$

SUBCONTRATACIÓN DE TAREAS		
Descripción	Empresa	Coste imputable
Oficina técnica	Empresa asociada a la Universidad	353,19 €
Coste total		353,19 €

COSTES DE MATERIAL FUNGIBLE		
Descripción	Empresa	Coste imputable
Material de la antena		100 €
Coste total		100 €

6. Resumen de costes

Costes de personal	16.644,87 €
Coste de amortización	403,72 €
Subcontratación de tareas	353,19 €
Costes de material fungible	100 €
Coste total	17.501,78 €

Bibliografía

- [1] Constantine A. Balanis. *Antenna Theory: Analysis and Design*. Wiley-Interscience, 2005.
- [2] P. Bhartia, K.V.S. Rao, and R.S. Tomar. *Millimeter-wave Microstrip and Printed Circuit Antennas*. Antennas and Propagation Library. Artech House, 1991.
- [3] T. Cs. *CST MICROWAVE STUDIO*. CST Gesellschaft für Computersimulationstechnik, Bad Nauheimer Str. 19, 64289 Darmstadt, Germany.
- [4] S. Gao, Q. Luo, and F. Zhu. *Circularly Polarized Antennas*. Wiley - IEEE. Wiley, 2013.
- [5] G. Kumar and K.P. Ray. *Broadband Microstrip Antennas*. Artech House antennas and propagation library. Artech House, 2002.
- [6] G. Mayhew-Ridgers, J.W. Odendaal, and J. Joubert. Single-layer capacitive feed for wideband probe-fed microstrip antenna elements. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 51(6):1405–1407, June 2003.
- [7] J.F. Zürcher and F.E. Gardiol. *Broadband Patch Antennas*. Artech House antenna library. Artech House, 1995.